

**Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**  
**Katedra telekomunikační techniky**

**Vlastnosti svítivých diod jako fotodetektorů**  
**Properties of LED as Photodetectors**

**2014**

**Vít Slováček**

## Zadání bakalářské práce

Student:

**Vít Slováček**

Studijní program:

B2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor:

2601R013 Telekomunikační technika

Téma:

Vlastnosti svítivých diod jako fotodetektorů  
Properties of LED as Photodetectors

Zásady pro vypracování:

1. Prostudujte a popište stručně vnitřní fotoelektrický jev v PN přechodu. Popište základní zapojení vhodná pro zesílení signálu z fotodiod.
2. Zvolte vhodné zapojení detektoru optického signálu s LED různých typů a proveďte jejich detekční vlastnosti s LED jako zdrojem světla a také na slunečním světle.

Seznam doporučené odborné literatury:


- [1] DOLEČEK, J. Moderní učebnice elektroniky 3. díl: Optoelektronika a optoelektronické prvky. Praha: BEN, 2005. ISBN 978-80-7300-288-6.  
[2] TIETZE, U; SCHENK, C. *Electronic circuits : design and applications*. Berlin : Springer, 1991. 928 s. ISBN 3-540-50608-X.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Dr. Ing. Libor Gajdošík**

Datum zadání: 01.09.2013

Datum odevzdání: 07.05.2014

  
\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.  
vedoucí katedry



  
\_\_\_\_\_  
prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
děkan fakulty

## Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou/diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: 2. května 2014



.....  
podpis studenta

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval Dr. Ing. Liboru Gajdošíkovi za odbornou pomoc a konzultaci při vytváření této bakalářské práce, také bych rád poděkoval za odbornou pomoc Ing. Michalu Kelnarovi.

## **Abstrakt**

Bakalářská práce pojednává o vlastnostech polovodičových LED diod v použití jako fotodetektory. LED diody mohou být použity jako fotodiody (fotodetektory), protože mají velmi podobnou konstrukci a také mají PN přechod, na který může dopadat světelné záření.

Cílem práce bylo měření s LED diodami, kdy byly zjišťovány jejich detekční vlastnosti na světelný signál. Jako světelný signál byly použity jak LED diody, tak i sluneční záření.

V bakalářské práci byla ověřena platnost fyzikálních jevů, jakou jsou absorpce energie, spontánní emise energie a vnitřní fotoelektrický jev. V bakalářské práci jsou také vysvětleny podmínky pro umožnění detekce a vyzařování světelného záření.

## **Klíčová slova**

LED dioda; fotodioda; PN přechod; vnitřní fotoelektrický jev.

## **Abstract**

Bachelor thesis deals with the properties of semiconductor LEDs in use as photodetectors. LEDs can be used as photodiodes (photodetectors), because they have a very similar structure and also have a PN junction on which the light radiation can fall.

The measurement of LEDs was the objective of present thesis and the impact of the light signal on their detection characteristics was found out. The light signal was used as the LEDs and sunlight.

In the bachelor thesis physical phenomena was validated by energy absorption, spontaneous emission power and internal photoelectric effect. The bachelor thesis also explains the conditions that allow the detection and emitting of light.

## **Key words**

LED; photodiode; PN junction; internal photoelectric effect.

## Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotky	Význam symbolu
$\alpha$	°	Vyzařovací úhel
$A$	-	Zesílení
$D_n$	$m^2 \cdot s^{-1}$	Elektronová difúzní konstanta
$D_p$	$m^2 \cdot s^{-1}$	Děrová difúzní konstanta
$e$	C	Elementární náboj
$E_1$	eV	Nížší energetická hladina
$E_2$	eV	Vyšší energetická hladina
$E$	eV	Energie
$E_C$	eV	Dolní okraj vodivostního pásu
$E_V$	eV	Horní okraj valenčního pásu
$h_{21E}$	-	Proudový zesilovací čísel
$h$	J·s	Planckova konstanta
$I$	A	Proud
$I_s$	A	Saturační proud
$k$	$J \cdot K^{-1}$	Boltzmanova konstanta
$L_n$	m	Elektronová difuzní délka
$L_p$	m	Děrová difuzní délka
$l_v$	cd	Svítivost
$\mu_n$	$m^2 \cdot V^{-1} \cdot s^{-1}$	Děrová pohyblivost
$\mu_p$	$m^2 \cdot V^{-1} \cdot s^{-1}$	Elektronová pohyblivost
$N_A$	$m^{-3}$	Koncentrace donorů
$N_c$	$m^{-3}$	Efektivní hustota stavů ve vodivostním pásu
$N_D$	$m^{-3}$	Koncentrace donorů
$N_v$	$m^{-3}$	Efektivní hustota stavů ve

---

		valenčním pásu
$\eta$	%	Kvantová účinnost
$\eta_{int}$	%	Vnitřní kvantová účinnost
$P$	W	Výkon
$R$	$\Omega$	Odpor
$S$	$A \cdot W^{-1}$	Citlivost.
$\tau_n$	s	Rekombinační životnost elektronů
$\tau_p$	s	Rekombinační životnost děr
$U$	V	Napětí
$\nu$	Hz	Frekvence
$\Phi$	lm	Světelný tok
$\Omega$	sr	Prostorový úhel

---



# Seznam použitých zkratk

Zkratka	Význam
LED	Light Emitting Diode (světlo emitující dioda).
PN	Rozhraní příměsového polovodiče typu P a polovodiče typu N.
VA	Voltampérová.

# Obsah

Úvod .....	- 12 -
1 Základní fyzikální jevy .....	- 13 -
1.1 Pásová struktura polovodičů .....	- 13 -
1.2 Absorpce a spontánní emise fotonu .....	- 14 -
1.2.1 Absorpce fotonu .....	- 14 -
1.2.2 Spontánní emise fotonu .....	- 14 -
1.3 Koherentní a nekoherentní záření .....	- 15 -
1.3.1 Koherentní záření .....	- 15 -
1.3.2 Nekoherentní záření .....	- 15 -
2 PN přechod .....	- 16 -
2.1 Homogenní přechody .....	- 16 -
2.2 Heterogenní přechody .....	- 16 -
3 Vnitřní fotoelektrický jev .....	- 17 -
4 LED dioda .....	- 18 -
4.1 Historie LED diody .....	- 18 -
4.2 Princip LED diody .....	- 19 -
4.3 Závislost proudu LED diody .....	- 21 -
4.4 Barvy vyzařovaného světla v závislosti na prahovém napětí .....	- 21 -
4.5 Struktura LED diody .....	- 22 -
4.6 Svítivost LED .....	- 24 -
4.7 Interní, extrakční a externí účinnost .....	- 24 -
4.8 Využití LED diody .....	- 25 -
5 Fotodioda .....	- 26 -
5.1 Historie fotodiody .....	- 26 -
5.2 Princip fotodiody .....	- 26 -
5.3 Struktura fotodiody .....	- 26 -
5.4 Režimy fotodiody .....	- 27 -
5.4.1 Fotovoltaický režim .....	- 28 -
5.4.2 Fotovodivostní režim .....	- 29 -

5.5	Vlastnosti polovodičových detektorů .....	30 -
5.5.1	Citlivost fotodetektoru .....	30 -
5.5.2	Kvantová účinnost.....	30 -
5.6	Využití fotodiody .....	31 -
6	Základní zapojení pro zesílení signálu z fotodiod .....	32 -
6.1	Zapojení s operačním zesilovačem.....	32 -
6.1.1	Invertující zesilovač .....	32 -
6.1.2	Neinvertující zesilovač .....	33 -
6.2	Zapojení s bipolárním tranzistorem NPN.....	34 -
6.2.1	Stejnoseměrný tranzistorový zesilovač se společným emitorem .....	34 -
6.2.2	Darlingtonova dvojice .....	35 -
7	Měření s LED diodami .....	36 -
7.1	Volt-ampérová charakteristika .....	36 -
7.1.1	VA charakteristika v závislosti na barvě vyzařovaného světla .....	36 -
7.1.2	VA charakteristika v závislosti na materiálu součástky .....	37 -
7.2	Fotovoltaický režim LED diody.....	38 -
7.2.1	Vysílací LED dioda - ultrafialová.....	39 -
7.2.2	Vysílací LED dioda - modrá .....	40 -
7.2.3	Vysílací LED dioda - zelená .....	40 -
7.3	Fotovodivostní režim LED diody .....	42 -
7.4	Zesílení přijímaného signálu LED diody .....	43 -
7.4.1	Invertující zesilovač .....	43 -
7.4.2	Neinvertující zesilovač .....	44 -
7.4.3	Darlingtonova dvojice .....	45 -
7.5	Detekce slunečního záření LED diody LABVIEW.....	46 -
7.5.1	Programování LABVIEW.....	46 -
7.5.2	Grafický výstup LABVIEW.....	47 -
8	Závěr.....	48 -
9	Použitá literatura .....	50 -
	Seznam příloh .....	51 -

## Úvod

Proč používat LED diodu i fotodiodu ve stejné aplikaci, když LED dioda může sloužit jako detektor světla. Představme si automobil s LED diodovými světly, která nám při jízdě v noci osvětlují vozovku, ale co kdyby nám ta stejná LED světla sloužila jako detektory slunečního záření? Před projíždkou by se tato světla chovala jako detektory, které by nastavovaly např. ztmavování oken a spouštění světel.

Ale abychom pochopili, na jakém principu pracují LED diody, které světlo přijímají nebo naopak vyzařují, musíme znát fyzikální jevy jakou jsou absorpce energie, spontánní emise energie a vnitřní fotoelektrický jev. Na základě vnitřního fotoelektrického jevu funguje LED dioda, která světlo přijímá. Za popsání a vysvětlení tohoto jevu byl Albert Einstein roku 1921 oceněn Nobelovou cenou, když tímto objevem dokázal, že světelná kvanta existují. Z teorie bychom měli znát pásové struktury polovodičů, na těchto strukturách lze názorně vidět, jaké budou detekční vlastnosti LED diod. Pásová struktura polovodičů názorně ukazuje velikost zakázaného pásu, jež závisí na použitém materiálu. Od velikosti zakázaného pásu se odvíjí detekční vlastnosti fotodetektorů.

Dále jsme se zabývali zesilováním signálu z fotodetektoru. V těchto kapitolách je popsáno základní zapojení tranzistorového zesilovače, Darlingtonovy dvojice, dále zapojení s invertujícím a neinvertujícím operačním zesilovačem.

V měření, které probíhalo pro potřebu bakalářské práce, byla propojena oblast teorie s praktickými ukázkami, na kterých si můžeme ověřit fyzikální jevy, které byly popsány před bezmála 90 lety.

# 1 Základní fyzikální jevy

## 1.1 Pásová struktura polovodičů

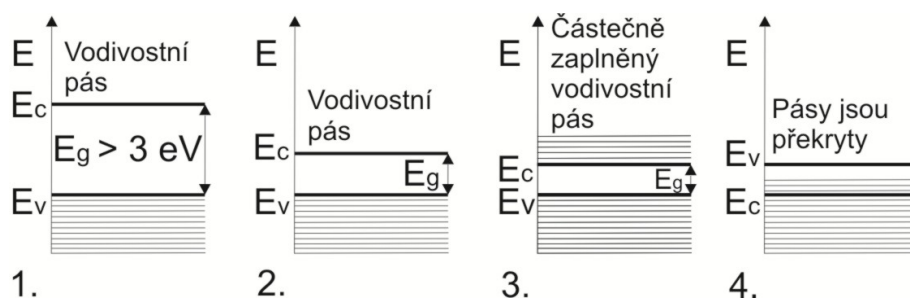
Pásová struktura obsahuje tyto energetické pásy: vnitřní, valenční vodivostní a zakázané pásy.

Vnitřní pásy nemají žádný význam pro přenos elektrického náboje, protože tyto pásy obsahují pevně vázané elektrony k jádru.

První pásy pro nás důležité jsou valenční pásy, kde jsou hladiny elektronů vytvářeny chemickou vazbou.

Dalšími důležitými pásy jsou zakázané pásy, které oddělují pásy valenční od vodivostních.

Posledními pásy jsou vodivostní pásy, tyto pásy umožňují látce vést elektrický proud. Látka může vést elektrický proud proto, že se elektrony, které jsou uvolněny z chemických vazeb, mohou pohybovat v meziatomovém prostoru.



Obrázek 1.1: Pásový model: 1. Izolant 2. Polovodič 3. Monovalentní kov

4. Bivalentní kov

$E_v$  značí horní okraj valenčního pásu,  $E_c$  značí dolní okraj vodivostního pásu,  $E_g$  značí šířku zakázaného pásu, šířka zakázaného pásu nám také udává elektrické vlastnosti látky a také z šířky zakázaného pásu můžeme rozeznat druh dané látky.

U izolantů je zakázaný pás větší než 3 eV, to dané látce neumožňuje vést elektrický proud, elektrony nemohou přejít z valenčního pásu do vodivostního.

Velikost zakázaného pásu u polovodičů je od 0,1 až do 2 eV, tzn., že pokud této látce dodáme dostatečnou energii, tj. energie musí být větší než energie zakázaného pásu, pak se může elektron dostat do vodivostního pásu a z tohoto důvodu může látka vést elektrický proud.

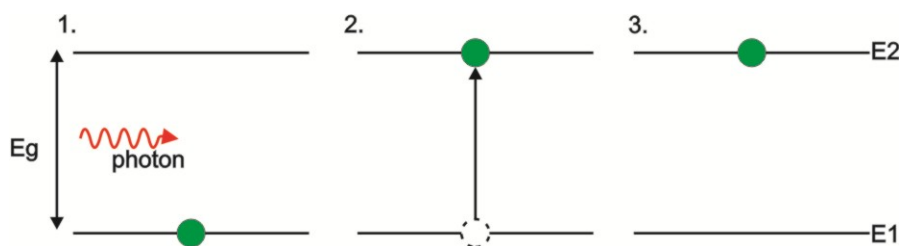
Monovalentní kovy (např. sodík, rubidium) mají velikost zakázaného pásu menší než 0,1 eV.

Bivalentní kovy mají valenční pás a vodivostní překryt, a proto dobře vedou elektrický proud. Bivalentní kovy se využívají jako vodiče (měděný vodič). [7]

## 1.2 Absorpce a spontánní emise fotonu

Jak víme z předešlé kapitoly, tak u polovodičů máme elektrony ve valenčním pásmu. Tyto elektrony se nemohou pohybovat nahodile a nemůžou nahodile přecházet z valenčního do vodivostního pásu. Tyto elektrony mohou přejít z valenčního do vodivostního pásu jen za určitých předpokladů, které budou popsány dále.

### 1.2.1 Absorpce fotonu



Obrázek 1.2: 1. Elektron v základním stavu,  
2. Přejít elektronu do excitovaného stavu,  
3. Elektron v excitovaném stavu

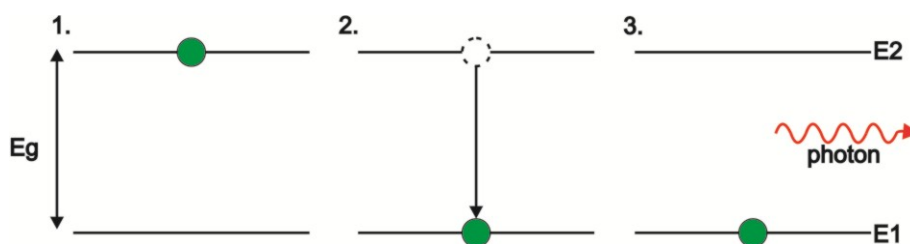
Absorpce fotonu je proces, kdy elektron, který je na energetické hladině  $E_1$ , absorbuje foton a pokud foton, který absorboval, má energii větší, než je energie zakázaného pásu  $E_g$  v dané látce, tak se elektron přesune na vyšší energetickou hladinu  $E_2$ . Poté, co se přesune elektron na vyšší energetickou hladinu, zůstává na jeho předešlém místě díra.

Energie pohlceného fotonu se rovná:

$$E = E_2 - E_1 = h\nu \quad (1.1)$$

*zde napište rovnici* Kde  $E_2$  je vyšší energetická hladina,  $E_1$  nižší energetická hladina,  $h$  je Planckova konstanta a  $\nu$  je frekvence.

### 1.2.2 Spontánní emise fotonu



Obrázek 1.3: 1. Elektron v excitovaném stavu  
2. Přejít elektronu do základního stavu  
3. Elektron v základním stavu

Spontánní emise fotonu je přesně opačný proces vůči absorpci fotonu. Elektron je v excitovaném stavu nebo-li je na vyšší energetické hladině vlivem dodání energie. V tomto stavu elektron zůstává řádově desítky femtosekund. Poté se vrací na nižší energetickou hladinu

a nechává na předešlém místě díru. V tu chvíli, kdy elektron přechází z vyšší energetické hladiny do nižší energetické hladiny, vyžáří energii rovnou zakázanému pásu.

Spontánní emise se nazývá proto, že vyžářený foton má náhodný směr, fázi a polarizaci, tudíž toto světlo nazýváme nekoherentním zářením.

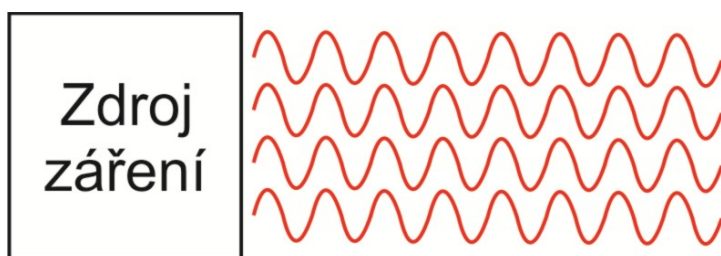
Energie vyžářeného fotonu se rovná:

$$E = E_2 - E_1 = h\nu \quad (1.2)$$

Kde  $E_2$  je vyšší energetická hladina,  $E_1$  nižší energetická hladina,  $h$  je Planckova konstanta a  $\nu$  frekvence.

### 1.3 Koherentní a nekoherentní záření

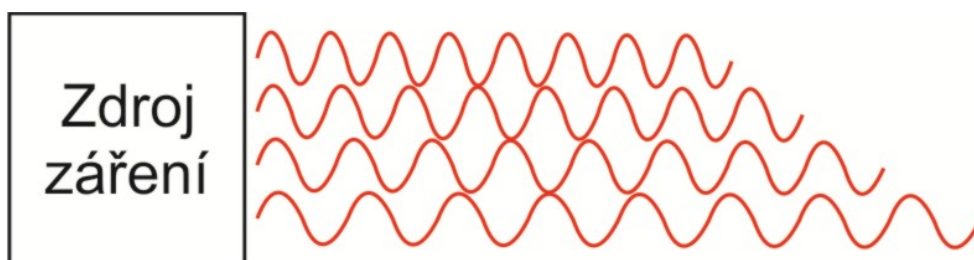
#### 1.3.1 Koherentní záření



Obrázek 1.4: Zdroj koherentního záření

Koherentní záření vzniká stimulovanou emisí fotonu, tohoto jevu se využívá u laseru. Z obrázku 1.4 můžeme vidět, že koherentní záření má stejnou vlnovou délku, fázi a také je tento paprsek velmi málo rozbíhavý.

#### 1.3.2 Nekoherentní záření



Obrázek 1.5: Zdroj nekoherentního záření

Koherentní záření vzniká spontánní emisí fotonu, tohoto jevu využívá LED dioda. Z obrázku 1.5 můžeme vidět, že vlny nekoherentního záření se rozcházejí.

## 2 PN přechod

PN přechod je rozhraní mezi dvěma polovodiči, při němž polovodič typu N má převážně elektronovou vodivost a polovodič typu P má převážně děrovou vodivost. Existují dva typy a to homogenní přechod, který je tvořen jedním monokrystalem, nebo heterogenní přechod, který je tvořen ze dvou různých materiálů a to tak, že uprostřed krystalu je např. polovodič GaAs a po stranách jsou AlGaAs. Z toho vyplývá, že heterogenní přechod obsahuje více PN přechodů a je tedy také účinnější než přechod homogenní.

### 2.1 Homogenní přechody

- pn používají se stejné materiály, každý z materiálů má jinou vodivost
- nn<sup>+</sup>, pp<sup>+</sup> používají se stejné materiály, každý z materiálů má stejnou vodivost s různou koncentrací příměsí
- pi, ni používají se stejné materiály s vlastní a nevlastní vodivostí

### 2.2 Heterogenní přechody

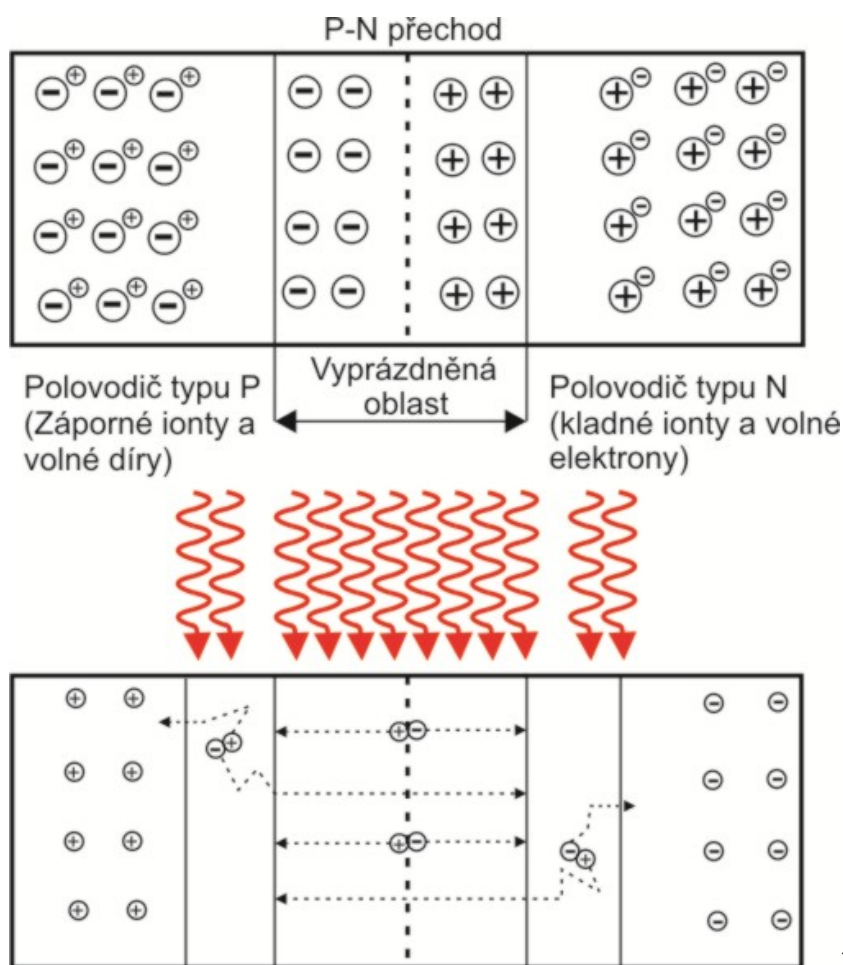
- heterogenní přechod tvoří dva různé polovodičové materiály
- heterogenní přechod tvoří kov a polovodič
- heterogenní přechod tvoří kov, izolant a polovodič[11]



### 3 Vnitřní fotoelektrický jev

Vnitřní fotoelektrický jev se využívá u polovodičových elektronických součástek, které detekují světlo. Aby polovodičová součástka mohla detekovat světlo, musí být její PN přechod otevřený, tzn. musí na PN přechod dopadat záření (což konstrukce LED diody umožňuje).

Při popisu tohoto jevu budeme vycházet z absorpce fotonu. Poté, co je PN přechod ozářen, dostává se elektron na vyšší energetickou hladinu, tzn. ihned, co se elektron dostane z valenčního do vodivostního pásu, zůstává po něm díra. Elektrony a díry driftují opačným směrem, elektrony se pohybují k polovodiči typu N a díry se pohybují k polovodiči typu P. Tento transport elektronů a děr vyvolá elektrický proud.



Obrázek 3.1: Shora: fotodioda v klidovém stavu, fotodioda ve stavu kdy dopadá záření na PN přechod

## 4 LED dioda

Česká zkratka LED je významově shodná s anglickým názvem Light Emitting Diode, čímž se rozumí dioda, jež vydává světlo a u níž je uplatněn elektroluminiscenční princip, fungující na polovodičovém přechodu PN, na němž dochází k přímé přeměně elektrické energie na světelnou.

### 4.1 Historie LED diody

Před více jak padesáti lety (v roce 1962) vyvinul tehdy 33letý vědec Dr. Nick Holonyak, Jr. první diodu vyzařující viditelné světlo (LED). Pracoval pro společnost GE, v jejíchž laboratořích již probíhal výzkum možných aplikací polovodičů a vědci zde vyvíjeli předchůdce moderních diod - tyristory a usměrňovače.

O několik let později se LED diody dostaly pouze do laboratoří a výzkumných ústavů, staly se součástí laboratorních přístrojů, elektronických zkušebních přístrojů, později ale také běžných domácích spotřebičů jako jsou televizory, rádia, telefony, kalkulačky, ještě později také na trh a staly se komerčním zbožím v již tradičním červeném odstínu. Plně nahradily klasické ukazatele, začaly se objevovat v tzv. sedmi-segmentových displejích. Jejich vývoj nebyl na takové úrovni, aby stačil světelným výkonem k osvětlení prostoru.

V 70. letech 20. století byly objeveny i další barvy LED diod, např.: zelená, žlutá, oranžová. Co se dříve zdálo nemožným, absurdním, utopickým se postupem času jevílo jako reálný cíl, využít LED diody k osvětlení a jiným účelům.

V 80. letech 20. století dochází k plnému rozkvětu technologie věnující pozornost LED, objevily se nové barvy, ale rovněž tvary, dokonce i první LED žárovky, které sloužily dekorativním účelům, např. jako okrasná svítidla, nenaplněly však zatím plně funkční osvětlení z důvodu malého vyzařovacího úhlu a svítivosti.

Až v 90. letech byla vyrobena první bílá LED dioda na bázi modré diody v kombinaci s luminoforem bez použití tří různobarevných (RGB) čipů. Tento typ otevřel cestu k výrobě první LED žárovky.

Na počátku 21. století, konkrétně v roce 2002, se díky investicím do technologie LED mohlo začít reálně uvažovat o plné účinnosti a nahraditelnosti běžné žárovky díky společností Lumileds, jež přivedla na trh 5 wattové LED diody s měrným výkonem 18-221 m/W (běžná žárovka 60-100 W s měrným výkonem 151 m/W).

Dalším výrazným a významným krokem byl počín americké společnosti CREE, která v roce 2003 vyrobila bílý LED čip s měrným výkonem 651 m/W, jenž se v té době stal fenoménem, jelikož byl čtyřikrát účinnější než běžná žárovka.

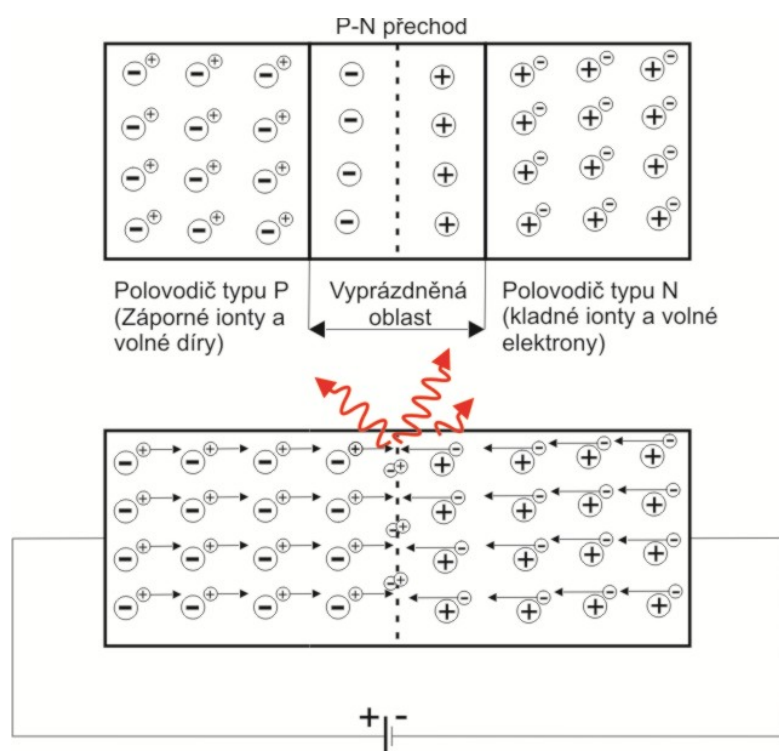
V následujících letech docházelo k postupnému navyšování měrného výkonu, k dosažení hranice 1601 m/W.

O vynález Dr. Nick Holonyaka, Jr. projevily zájem světoznámé společnosti, které mají stovky provozoven a poboček, např. Starbucks, Walmart, Target či Marriott, a jimž snížily LED diody nejen spotřebu energie, ale rovněž úsporu v nákladech na údržbu.

LED technologii postupně začala využívat velkoměsta i maloměsta pro osvětlení silnic a veřejných prostor. [4,5]

## 4.2 Princip LED diody

U principu LED diody využijeme znalosti spontánní emise fotonu. Z teorie, která je popsána výše, víme, že když elektron pohltí elektrickou energii, přejde z valenčního do vodivostního pásu, stejně tomu je, když jakkoli přijme energii např. zvýšením teploty nebo chemickou reakcí.



Obrázek 4.1: Shora: LED dioda v klidovém stavu,  
Dole: LED dioda v propustném směru

Na obrázku 4.1 je zapojena LED dioda v propustném směru, čímž byla elektronům dodána energie. Elektron potřebuje energii větší, než je zakázaný pás dané látky, aby se mohl přesunout z valenčního do vodivostního pásu, poté, co je tato podmínka splněna, se elektron dostává do vodivostního pásu a na svém předešlém místě ponechává díru, v tomto stavu nevydrží dlouho a poté musí klesnout do valenčního pásu. Energii, kterou elektron přijal, musí také odevzdat a pokud elektron rekombinuje s dírou, tak odevzdává energii o velikosti zakázaného pásu.

Jsou dva druhy rekombinace a to zářivá, kterou můžeme sledovat u LED diody odevzdáním energie ve formě fotonu, a nezářivá rekombinace, kde je energie pohlcena krystalickou mřížkou a projeví se zvýšením teploty čipu.

Přechodem LED diody musí procházet elektrický proud v propustném směru, poté přechod vyzařuje nekoherentní světlo s úzkým spektrem. Energie fotonů vyzařující z polovodiče se rovná rozdílu vodivostního a valenčního pásu

$$E_g = |E_C - E_V| \approx h\nu, \quad (4.1)$$

kde písmeno  $h$  je Planckova konstanta a písmeno  $\nu$  je frekvence. Výsledná energie  $E_g$  se nazývá energie zakázaného pásu, tento vztah pro výpočet energie zakázaného pásu odvodil Albert Einstein.

Ideální případ vztahu Alberta Einsteina by znamenal, že zákon o zachování energie vyžaduje, aby energie, se kterou byl elektron injektován, byla rovna energii fotonu. Následující rovnice odpovídá popisovanému vztahu

$$eU = h\nu, \quad (4.2)$$

kde  $eU$  je energie pole ( $U$  znamená elektrické napětí na diodě a  $e$  znamená elektrický náboj). Tento stav, jak jsme si už řekli, je ideální, tento ideální stav můžou změnit určité jevy, které nastávají např.:

Distribuce volných nosičů náboje na přechodu PN z homogenního materiálu je závislá na difúzní konstantě nosičů. Difúzní konstanta nosičů není snadno měřitelná. Mnohem častěji se měří hybnost volných nosičů, např. Hallovým efektem. Difúzní konstantu lze odvodit z hybnosti nosičů Einsteinovým vztahem

$$D_n = \frac{kT}{e} \mu_n \quad (4.3)$$

$$D_p = \frac{kT}{e} \mu_p, \quad (4.4)$$

kde písmena  $D_n$  a  $D_p$  jsou difúzní konstanty elektronů a elektronových děr, písmeno  $k$  odpovídá Boltzmannově konstantě, písmenu  $T$  odpovídá termodynamická teplota (přechodu),  $\mu_n$  a  $\mu_p$  jsou hybnosti elektronů a elektronových děr.

Střední vzdálenost minoritního nosiče rekombinujícího před rekombinací je difúzní délka. Elektrony injektované do polovodiče typu P budou v průměru difundovat přes difúzní délku  $L_n$ , než dojde k rekombinaci s elektronovými děrami. Difúzní délka je dána vztahem

$$L_n = \sqrt{D_n \tau_n} \quad (4.5)$$

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p}, \quad (4.6)$$

kde  $\tau_n$  a  $\tau_p$  je doba životnosti elektronů a elektronových děr, resp. u typicky používaných polovodičů je difúzní délka v řádu několika mikrometrů.[1]

### 4.3 Závislost proudu LED diody

Volt-ampérová charakteristika ideálního PN přechodu LED diody je dána Shockleyho rovnicí

$$I = I_s \left( e^{\frac{eU}{kT}} - 1 \right), \quad (4.7)$$

kde  $I_s$  je saturační proud, definice ostatních proměnných viz výše.

Pro nedegenerativní polovodiče a v rámci zkrácených podmínek může být Shockleyho rovnice napsána takto

$$I = I_s^* \left( e^{\frac{(eV - E_g)}{kT}} - 1 \right), \quad (4.8)$$

kde

$$I_s^* = eA \left( \frac{D_p N_c N_v}{L_p N_D} + \frac{D_n N_c N_v}{L_n N_A} \right), \quad (4.9)$$

kde  $N_c$  je efektivní hustota stavů ve vodivostním pásu,  $N_v$  je efektivní hustota stavů ve valenčním pásu,  $N_D$  je koncentrace donorů,  $N_A$  koncentrace akceptorů. [1]

### 4.4 Barvy vyzařovaného světla v závislosti na prahovém napětí

Z Einsteinova vztahu víme, že

$$eU = h\nu \quad (4.10)$$

za frekvenci dosadíme

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad (4.11)$$

kde  $c$  je rychlost světla ve vakuu a  $\lambda$  je vlnová délka. Z toho pak

$$eU = h \cdot \frac{c}{\lambda} \quad (4.12)$$

Červená barva:

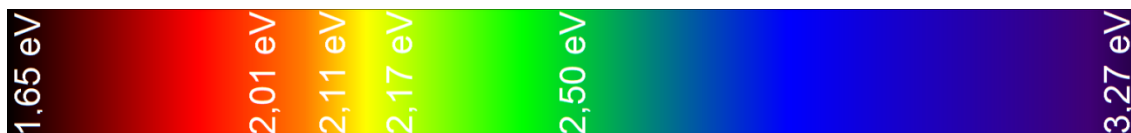
$$eU = 4,135667516 \cdot 10^{-15} \cdot \frac{300 \cdot 10^6}{650 \cdot 10^{-9}}$$

$$eU = 1,9088 \text{ eV}$$

Ultrafialové záření:

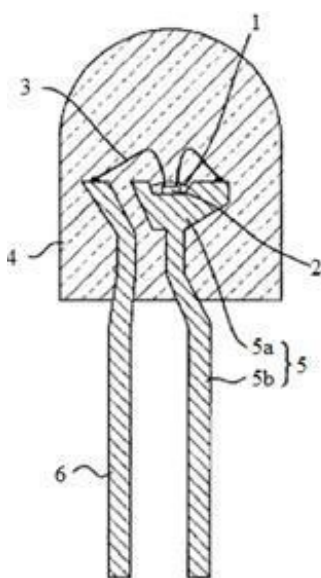
$$eU = 4,135667516 \cdot 10^{-15} \cdot \frac{300 \cdot 10^6}{650 \cdot 10^{-9}}$$

$$eU = 3,1018 \text{ eV}$$



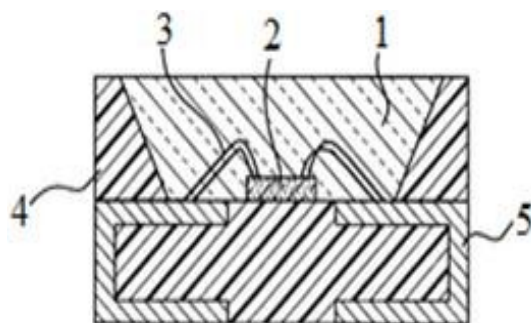
Obrázek 4.2: Závislost vyzařované barvy na prahovém napětí LED diody

#### 4.5 Struktura LED diody



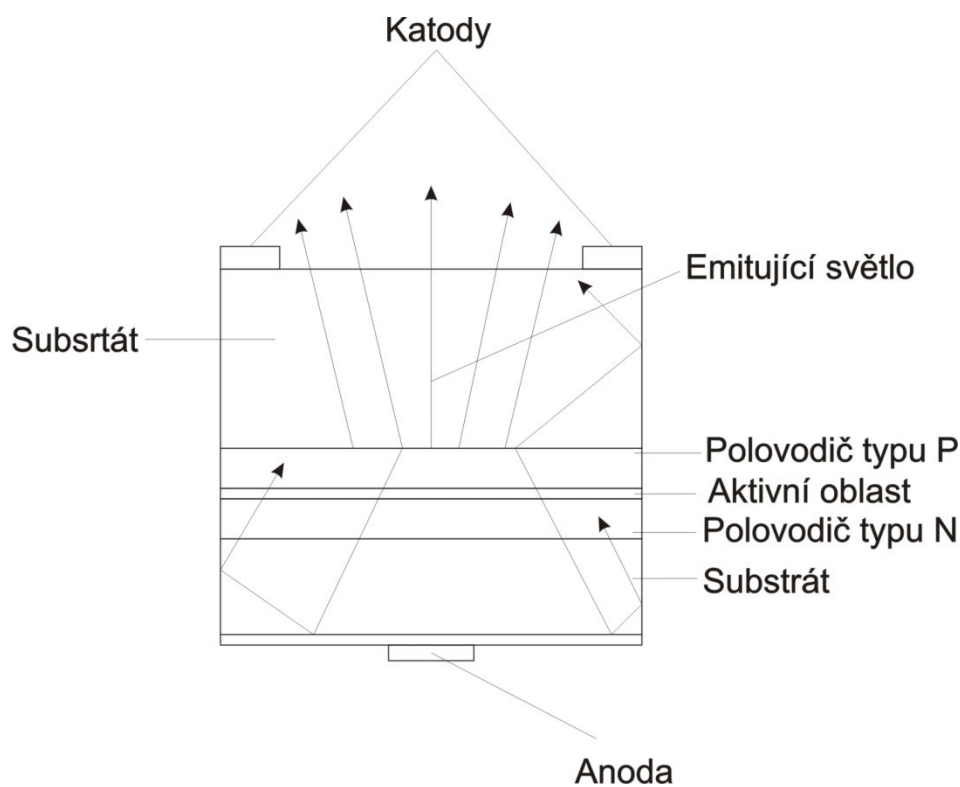
1. Potahový materiál, který obsahuje fosfor
2. LED čip, který vyzařuje světlo
3. Vodivé dráty
4. Obal za účel chránit LED čip (obsahuje dispergační činidlo, jeho použití v obalu vede ke zvětšení vyzařovacího úhlu)
- 5a. "Šálek", ve kterém je umístěn LED čip. V šálku je zalit LED čip potahovým materiálem.
- 5b. Katoda
6. Anoda

Obrázek 4.3: Struktura LED diody[2]



1. Povlakový materiál
2. LED čip vytvářející světlo je uchycena pomocí epoxidové pryskyřice, která obsahuje např: stříbro.
3. Vodivé dráty
4. Pouzdro LED čipu
5. Kovové svorky, na níž jsou dráty připojeny polovodič typu N a polovodič typu P.

Obrázek 4.4: Struktura LED čipu[2]



Obrázek 4.5: Detailní struktura LED čipu

Heterogenní strukturu LED diody tvoří, polovodič typu P může být např. AlGaAs. Polovodič typu N AlGaAs a aktivní oblast je GaAs. Polovodič typu P a N jsou totožné prvky jen s tím rozdílem, že každý má jinou dotaci.

## 4.6 Svítivost LED

$$l_v = \frac{\Phi}{\Omega}, \quad (4.13)$$

kde  $\Phi$  je světelný tok,  $\Omega$  je prostorový úhel, nebo

$$l_v = \frac{\Phi}{2\pi(1 - \cos\frac{\alpha}{2})}, \quad (4.14)$$

kde  $\alpha$  je vyzařovací úhel, pro přepočty ze světelného toku na svítivost můžeme použít

$$\Phi = l_v \cdot \Omega \quad (4.15)$$

nebo

$$\Phi = l_v \cdot 2\pi \left(1 - \cos\frac{\alpha}{2}\right) \quad (4.16)$$

Svítivost je základní jednotkou LED, jejíž jednotkou je kandela (cd), udává, jaký světelný tok vyzařuje bodový zdroj světla do prostorového úhlu. Svítivost ovlivňuje několik činitelů, např.: provedení pouzdra, použitý materiál nebo typ přechodu.

Na trhu se můžeme setkat s označením LED jako ultra-bright (ultrajasně) nebo super-bright (superjasné), což však nelze považovat za objektivní parametr výrobku, protože žádný takový standard není vytvořen. Tento parametr je jen výrobní specifikací daného výrobce. LED diody jsou z hlediska svítivosti běžně zařaditelné do tří skupin dle protékajícího proudu (vysoká / zvýšená / obvyklá).

## 4.7 Interní, extrakční a externí účinnost

Aktivní oblast ideální LED diody emituje jeden foton pro každý injektovaný elektron. Pro toto má ideální aktivní oblast LED diody kvantovou účinnost jedna. Vnitřní kvantová účinnost je definována jako

$$\eta_{int} = \frac{\text{počet emitovaných fotonů z aktivní oblasti za sekundu}}{\text{počet injektovaných elektronů v LED za sekundu}} = \frac{\frac{P_{int}}{h\nu}}{\frac{I}{e}}, \quad (4.17)$$

kde  $P_{int}$  je optický výkon vyzařovaný z aktivní oblasti a  $I$  je injektovaný proud.

Fotony emitované z aktivní vrstvy by v ideálním případě měly být všechny emitovány do volného prostoru v takovém případě by LED dioda měla extrakční účinnost rovnu jedné. Nicméně v reálné LED diodě se nedostanou všechny fotony emitované z aktivní oblasti do volného prostoru. Některé fotony nikdy neopustí polovodič. Zde jsou různé příklady ztrát např.: světlo může absorbovat substrát LED diody. Světlo může dopadnout na železný povrch, který může světlo absorbovat. Také může nastat totální odraz a světlo se odrazit zpět, v ideálním případě ze struktury neunikne ven. Extrakční účinnost je definována takto

$$\eta_{int} = \frac{\text{počet emitovaných fotonů z aktivní oblasti za sekundu}}{\text{počet injektovaných elektronů v LED za sekundu}} = \frac{\frac{P_{int}}{h\nu}}{\frac{I}{e}} \quad (4.18)$$

kde  $P$  je optický výkon emitovaný do volného prostoru.



Extrakční účinnost je omezení pro výkonné LED diody. Je velmi obtížné zvýšit tuto účinnost nad 50%, aniž bychom se uchýlili k velmi náročnému a nákladnému řešení tohoto omezení.

Externí kvantová účinnost je definována takto

$$\eta_{\text{ext}} = \frac{\text{počet emitovaných fotonů do volného prostoru za sekundu}}{\text{počet injektovaných elektronů v LED za sekundu}} = \frac{\frac{P}{h\nu}}{\frac{I}{e}} = \\ = \eta_{\text{int}} \cdot \eta_{\text{extraction}} \quad (4.19)$$

Externí kvantová účinnost udává poměr světelných částic k počtu injektovaných nabitých částic. [1]

## 4.8 Využití LED diody

LED diody jsou dnes již nedílnou součástí nejen technologických novinek, elektronických zařízení a indikátorů např. chirurgických nástrojů a přístrojů, ale i běžného života, např. výtahů, mobilních telefonů (smarth phone), monitorů, tabletů, dálkových ovladačů, fotoaparátů, komerčních obrazovek, semaforů apod. Staly se rovněž fenoménem v oblasti úsporného osvětlení nejen reklamních prostor a tabulí, ale také ordinací, restaurací, kanceláří, obchodních center, komerčních prostor, dopravních prostředků, ale také domácností, jejich interiérů i exteriérů.

LED diody zaznamenaly nebyvalý boom i v automobilovém průmyslu, v němž našly bohaté uplatnění nejen u světel brzdových, ale dnes již i u potkávacích, obrysových, mlhových, dálkových i směrových. Dnes již nejsou známkou luxusního vozu nebo luxusního vybavení interiéru vozu, staly se obvyklým prvkem ve velkovýrobě. Stejně jako v jiných oborech jsou pro automobilový průmysl vhodné pro svou nízkou spotřebu, jež se následně odráží v úspoře pohonných hmot i nižších emisí oxidu uhličitého. Jejich životnost je uváděna jako dvakrát delší než životnost samotného vozu, což je jejich dalším podstatnou výhodou.

Nedocenitelnou devízou je jejich uplatnění v bezpečnosti silničního provozu, kdy dokáží plně nahradit denní světlo, takže nejen že neoslňují protijedoucí automobily či chodce, ale také perfektně a přehledně osvětlí potřebný úhel a prostor, který tak řidiči dopomůže plně vnímat bezprostřední okolí včetně všech nástrah a překážek v podobě nečekaných objektů na silnici, např. lidí, zvířat, jiných vozidel. Nelze opomenout ani snížení případné řidičovy únavy pro jejich podobnost s denním světlem, čímž dochází ke snižování rizik dopravních nehod v nočních hodinách.

V dnešní době díky LED diodám klesá poptávka po žárovkách klasického typu, jelikož je všeobecným zájmem snížit náklady i spotřebu energie. LED diody a jejich aplikace se mohou jevit zpočátku jako velká investice, avšak návratnost je rychlá a prokazatelná. [6]

## 5 Fotodioda

### 5.1 Historie fotodiody

Technologie fotodiody se vyvinula z technologie klasické diody s PN přechodem ve 40. letech dvacátého století. Aplikacemi, ve kterých se využíval otevřený PN přechod diody, se zjistilo, že by dioda mohla být použita pro fotonické aplikace např. solární články.

Technologie fotodiody byla vylepšena v roce 1950 a ve druhé polovině tohoto desetiletí byla vyvinuta PIN dioda. Absorpce světla fotodiodou byla nejprve zkoumána v článku publikovaném v roce 1959 společností Gartner. V této době byl křemík oblíbeným materiálem pro výrobu fotodiody, ale uvažovalo se o použití germania, jeho použití přišlo na svět v roce 1962, kdy ho demonstroval Dr. Riesze.

Výzkum lavinová diody byl zahájen v roce 1953. První kroky udělali McAfee a McKaye, kteří se zabývali konceptem lavinové fotodiody.

Dalším druhem fotodiody, která byla vynalezena okolo roku 1962 byla Shottkyho dioda.

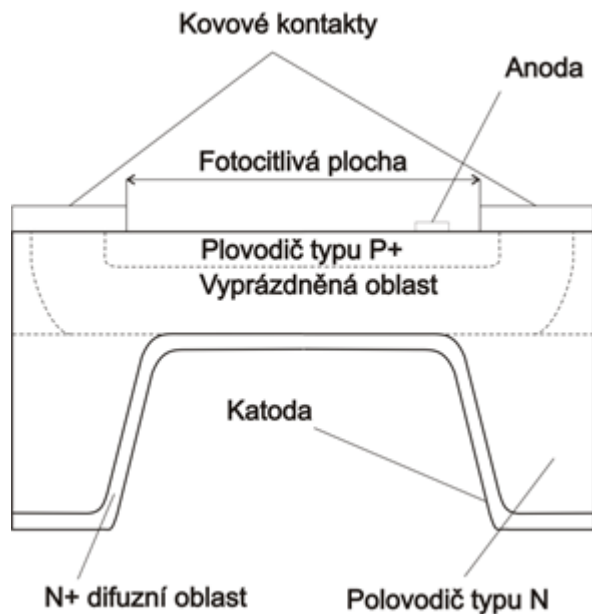
### 5.2 Princip fotodiody

Fotodioda pracuje na principu vnitřního fotoelektrického jevu, který využívá většina fotovodivostních detektorů. Vnitřní fotoelektrický jev byl vysvětlen v třetí kapitole.

### 5.3 Struktura fotodiody

Křemíkové fotodiody jsou vyrobeny z monokrystalu křemíkových plátek podobné těm, které používají při výrobě integrovaných obvodů. Hlavním rozdílem je, že diody vyžadují vyšší čistoty křemíku. Čistota křemíku závisí na jeho odporu, s vyšším odporem indikujeme vyšší čistotu křemíku.

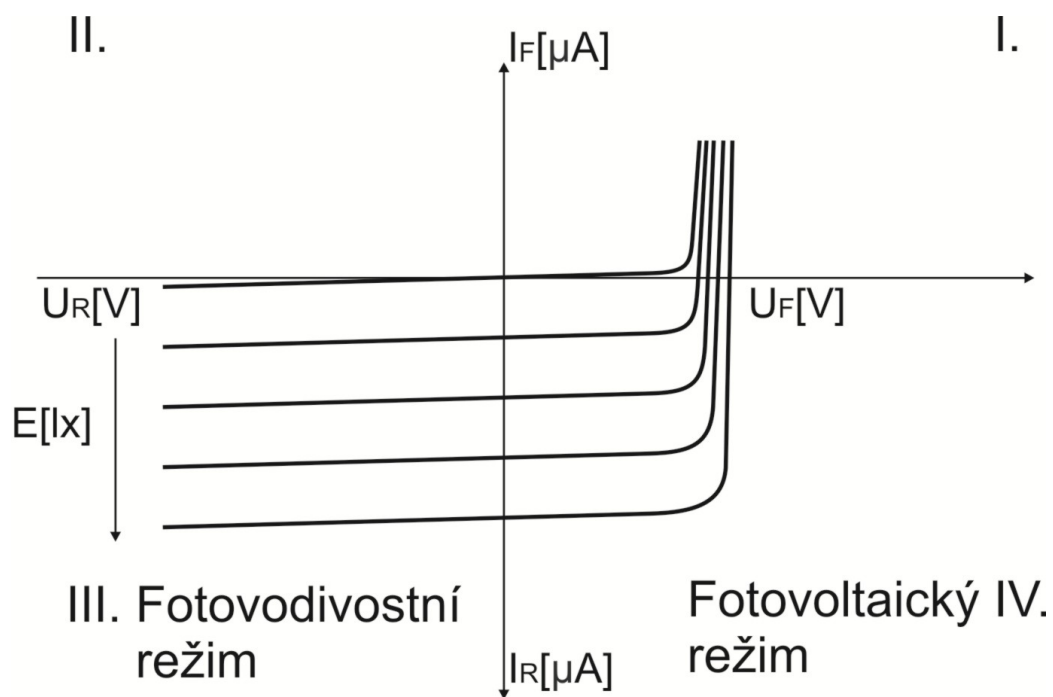
Průřez křemíkové fotodiody je znázorněn na obrázku. Křemík, který je polovodičem typu N, je výchozí materiál. Tenká vrstva polovodiče typu P je vytvořena na povrchu zařízení tepelnou difúzí nebo iontovou implantací příslušného materiálu (obvykle boru). Vrstva mezi polovodičem typu P a polovodičem typu N je známý jako PN přechod. Malé kovové kontakty jsou na horní straně povrchu zařízení, spodní část těchto kontaktů je potažena kontaktním kovem. Kontakty na spodní straně jsou katody a na horní straně povrchu je kontakt anoda. Fotocitlivá plocha je potažena buď nitridem křemíku, nebo křemíkem uhelnatým, nebo oxidem křemičitým, tyto sloučeniny slouží jako ochrana a také jako antireflexní vrstva. Tloušťka této vrstvy je optimalizována pro konkrétní vlnové délky záření. Jako příklad lze uvést Centro Vision Series 5 - T fotodioda, má povlak, který zvyšuje jeho reakci na modré části spektra.



Obrázek 5.1: Struktura fotodiody

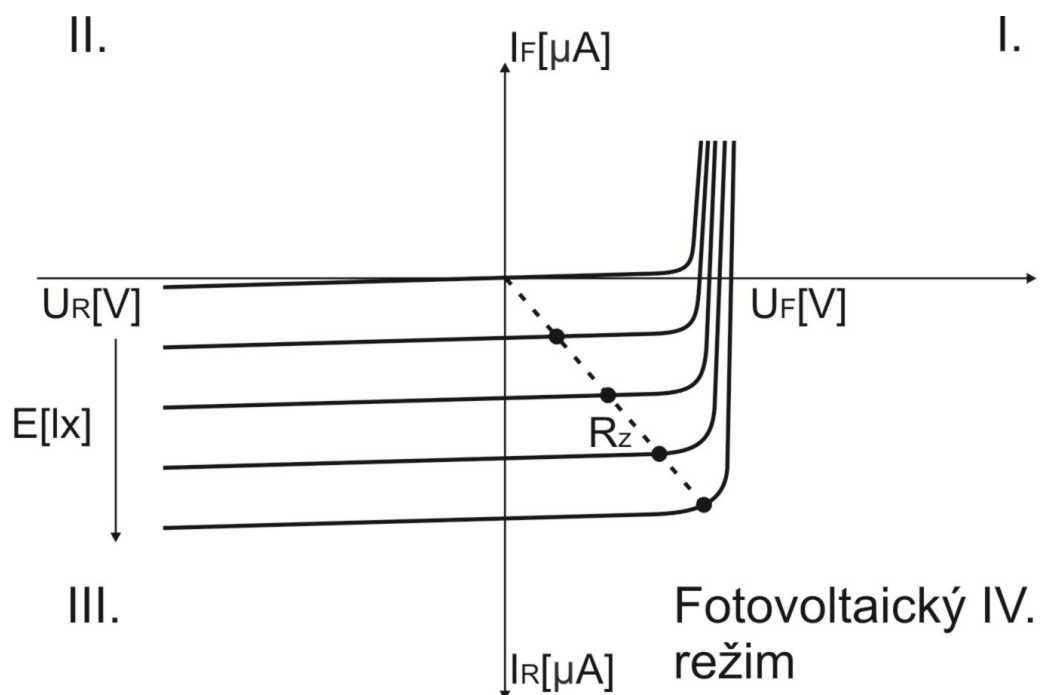
#### 5.4 Režimy fotodiody

Z voltampérové charakteristiky na obrázku 5.2 můžeme zjistit režimy fotodiody pomocí jednotlivých kvadrantů I-IV.



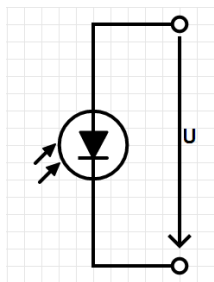
Obrázek 5.2: Voltampérová charakteristika fotodiody

## 5.4.1 Fotovoltaický režim



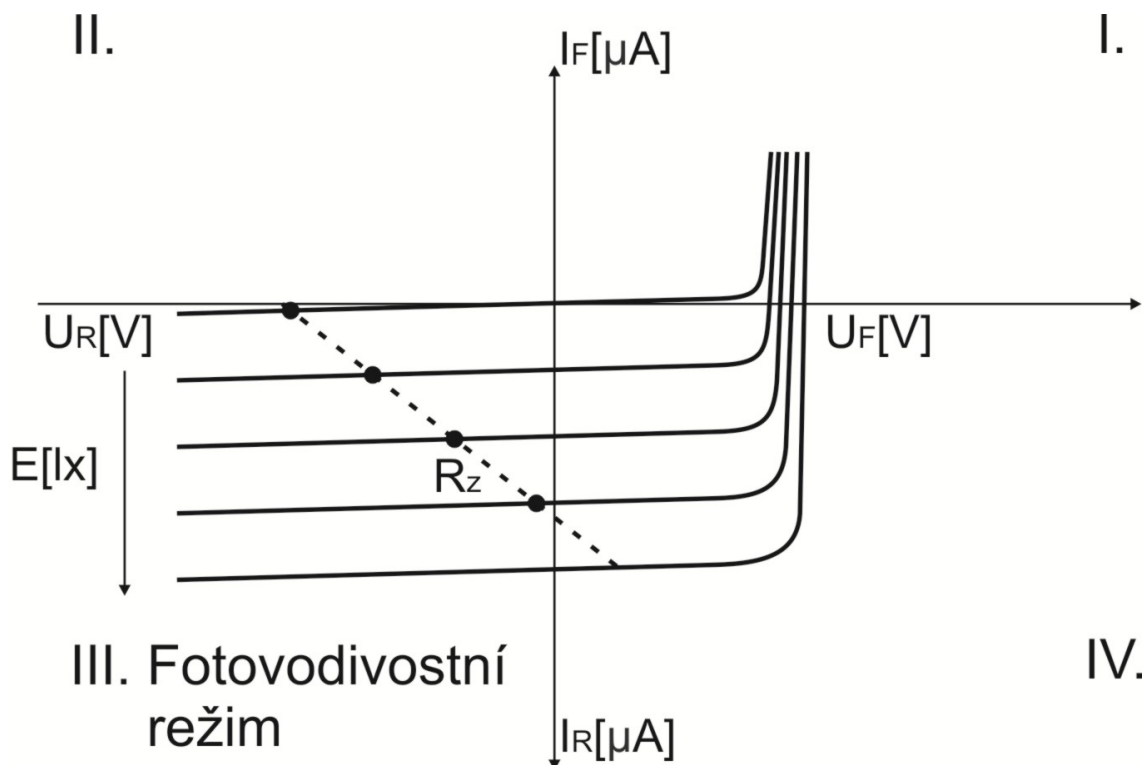
Obrázek 5.3: Titulek

Fotodioda, která pracuje ve fotovoltaičském režimu, pracuje ve IV. kvadrantu voltampérové charakteristiky. Čárkovaná přímka  $R_z$  značí zátěžovou přímku fotodiody ve fotovoltaičském režimu. Body, které jsou na přímce označeny se nazývají pracovní body. V tomto režimu můžeme diodu použít jako zdroj napětí. V měření budeme toto zapojení používat v režimu napětí naprázdno.



Obrázek 5.4: Zapojení fotodiody ve fotovoltaičském režimu na prázdkno

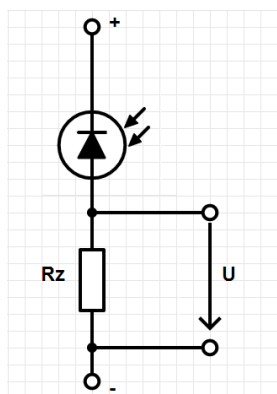
## 5.4.2 Fotovodivostní režim



Obrázek 5.5: Voltampérová charakteristika fotodiody

Fotodiody, která pracuje ve fotovodivostním režimu, pracuje ve III. kvadrantu voltampérové charakteristiky. Čárkovaná přímka  $R_z$  značí zátěžovou přímku fotodiody ve fotovodivostním režimu. Body, které jsou na přímce označeny se nazývají pracovní body. Fotodiody se po ozáření chová jako rezistor, řízený intenzitou osvětlení, které dopadá na fotocitlivou plochu diody. V tomto režimu dosahuje dioda největší citlivosti.

Z obrázku 5.6 vidíme, že dioda je zapojena v závěrném směru v sérii s odporem a zdrojem stejnosměrného napětí.



Obrázek 5.6: Zapojení fotodiody ve fotovodivostním režimu

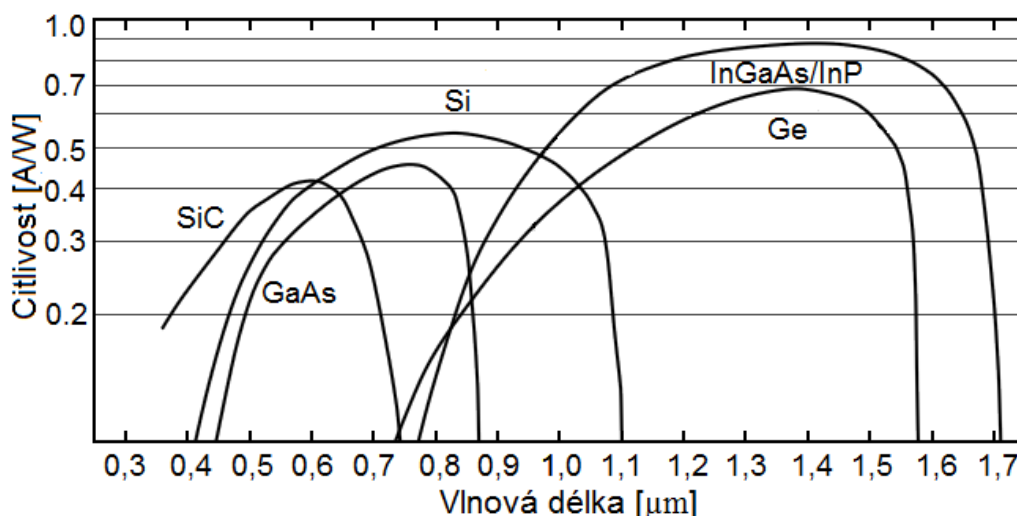
## 5.5 Vlastnosti polovodičových detektorů

### 5.5.1 Citlivost fotodetektoru

Citlivost nám vyjadřuje poměr mezi protékajícím elektrickým proudem a výkonem dopadajícího světla na fotodetektor.

$$S = \frac{I}{P} \quad (5.1)$$

Citlivost fotodetektoru roste s vlnovou délkou, protože fotoelektrické detektory jsou citlivé na fotonový tok nikoliv na optický výkon. Oblast, kde citlivost vzrůstá s vlnovou délkou, je omezená. Citlivost také přímo úměrně závisí na tloušťce ochuzené vrstvy a antireflexní úpravě povrchu sklíčka, kterým vstupuje světelný tok.[9]



Obrázek 5.7: Citlivost fotodetektoru

### 5.5.2 Kvantová účinnost

Kvantová účinnost fotodetektoru v ideálním případě by byla rovna 1. Tedy, že jeden foton dopadající na fotodetektor vytvoří jeden pár elektron-díra, který přispěje k proudu procházejícím detektorem.

$$\eta = \frac{\text{Počet generovaných párů elektron-díra}}{\text{Počet dopadajících fotonů}} \quad (5.2)$$

Jestliže současně dopadá více fotonů na fotodetektor, jak to v praxi většinou bývá, kvantová účinnost je rovna poměru generovaných párů elektron-díra, tedy jen těch párů elektron-díra, které přispívají k proudu fotodetektorem ku dopadajícímu toku všech fotonů.

Všechny dopadající fotony nejsou absorbovány, proto všechny dopadající fotony nevytvářejí páry elektron-díra. Některé fotony se odrazí od povrchu detektoru. Pokud je pár elektron-díra vytvořen v blízkosti povrchu detektoru, tak tento pár rychle rekombinuje, tzn., že

se elektron nestačí dostat do oblasti n a díra se nestačí dostat do oblasti p a nepřispějí tak k proudu detektorem.[8]

## 5.6 Využití fotodiody

Užití fotodiody je mnohostranné, zpočátku byly využívány ke snímání děrné pásy, stále se používají k měření osvětlení, v automatizaci, v dálkových ovladačích, ve faxech, v kopírovacích zařízeních, bezpečnostních kamerách a systémech, v televizních kamerách, digitálních fotoaparátech nebo v čtečkách čárových kódů. Největší koncentraci fotodiody můžeme nalézt u fotovoltaických elektráren, které jsou tvořeny solárními panely, jedním ze základních prvků solárních panelů jsou fotodiody, které přeměňují světelnou energii na elektrickou. Nevýhodou těchto panelů je finanční nákladnost a náročnost výroby.

## 6 Základní zapojení pro zesílení signálu z fotodiod

### 6.1 Zapojení s operačním zesilovačem

#### 6.1.1 Invertující zesilovač

Na invertující vstup zesilovače přivede vstupní napětí (napětí LED diody) připojené přes odpor  $R_1$ , toto napětí je na výstupu zesíleno ale s opačnou polaritou. Výstupní napětí se přivádí přes odpor  $R_2$  zpět na invertující vstup, tímto se napětí LED diody, které přivádíme na invertující vstup, zmenší, protože přivedené napětí z výstupu má opačnou polaritu.

Operační zesilovač má velké (v ideálním případě nekonečné) zesílení, obvod se ustálí ve stavu, kdy je v tomto uzlu jedna velmi malé napětí, proto se tomuto uzlu říká virtuální zem.

Odporem  $R_1$ , protéká proud, který je vyvolán napětím LED diody. Proud nemůže téci do vstupu operačního zesilovače, protože operační zesilovač má velký vstupní odpor. Tento proud poteče přes odpor  $R_2$  do výstupu operačního zesilovače. Odpory  $R_1$  a  $R_2$  nám tvoří odporový dělič, který je automaticky nastavuje tak, aby v uzlu jedna bylo nulové napětí.

$$I_1 = \frac{U_i}{R_1}, \quad (6.1)$$

kde  $I_1$  je proud rezistoru  $R_1$ ,  $U_d$  je napětí LED diody, tento vzorec vychází z Ohmova zákona. Dále

$$I_2 = -\frac{U_o}{R_2}, \quad (6.2)$$

kde  $I_2$  je proud rezistoru  $R_2$ ,  $U_z$  je výstupní napětí operačního zesilovače (zesílené napětí LED diody). Pro proudy platí

$$I_1 = I_2 \quad (6.3)$$

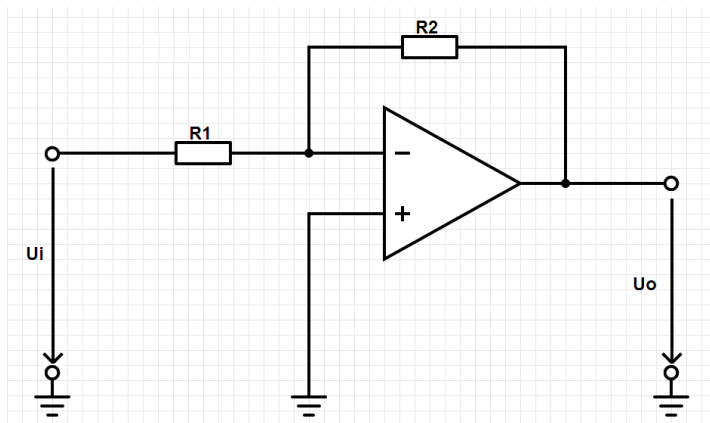
Ze vztahu pro proudy můžeme odvodit

$$U_z = -U_i \frac{R_2}{R_1} \quad (6.4)$$

Z toho plyne zesílení invertujícího zesilovače

$$A = -\frac{U_o}{U_i} = -\frac{R_2}{R_1} \quad (6.5)$$





Obrázek 6.1: Invertující operační zesilovač

### 6.1.2 Neinvertující zesilovač

U invertujícího operačního zesilovače jsme vstupní napětí připojovali na invertující vstup. Pokud přivedeme vstupní napětí na neinvertující vstup, tak vznikne neinvertující zapojení operačního zesilovače.

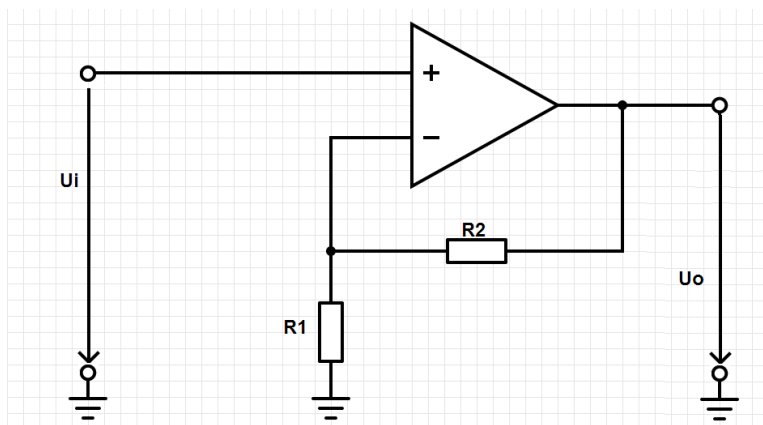
V ideálním případě mají být napětí mezi vstupními svorkami operačního zesilovače a proud tekoucí do obou vstupů nulové. V reálném zapojení jsou tyto hodnoty velmi malé.

Napětí na odporu  $R_1$  bude přibližně stejné jako vstupní napětí LED diody  $U_d$ .

Vzorec pro zesílení

$$A = \frac{U_o}{U_i} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (6.6)$$

Ze vzorce pro zesílení neinvertujícího zesilovače vyplývá, že zesílení invertujícího zesilovače je vždy větší než 1.

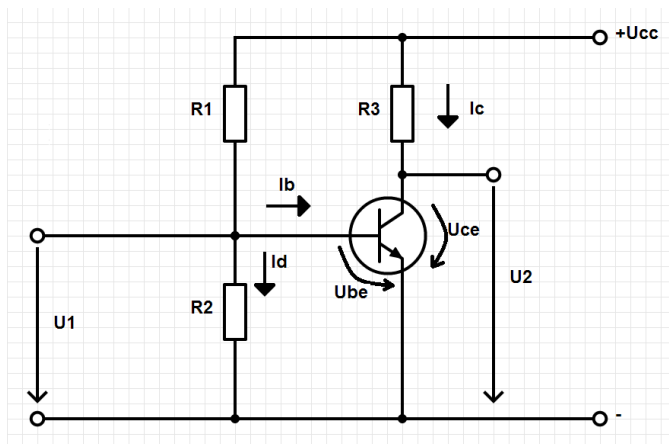


Obrázek 6.2: Neinvertující operační zesilovač

## 6.2 Zapojení s bipolárním tranzistorem NPN

### 6.2.1 Stejnsměrný tranzistorový zesilovač se společným emitorem

Zapojení se společným emitorem patří mezi jedny z nejpoužívanějších zapojení stejnosměrných zesilovačů. Zapojení se společným emitorem má vysoké proudové, napěťové i výkonové zesílení.



Obrázek 6.3: Tranzistorový zesilovač v zapojení se společným emitorem

Napětí  $U_{CE}$  obvykle volíme

$$U_{CE} = \frac{U_{CC}}{2} \quad (6.7)$$

a odpor  $R_3$  vypočteme ze vztahu

$$R_3 = \frac{U_{CC}}{2 \cdot I_c} = \frac{U_{CE}}{I_c} \quad (6.8)$$

Bázový proud určíme pro hodnotu zesilovacího činitele  $h_{21E}$

$$I_b = \frac{I_c}{h_{21E}} \quad (6.9)$$

Proud děličem volíme

$$I_d = I_b \cdot (5 \div 10) \quad (6.10)$$

Velikost  $I_d$  volíme takovou, aby nám proud báze neovlivňoval poměry na děliči napětí.

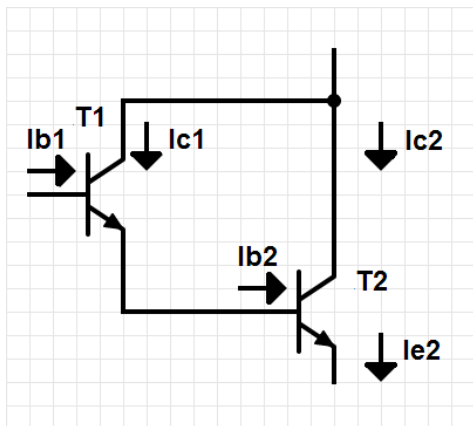
Napětí  $U_{BE}$  se u křemíkových tranzistorů pohybuje od 0,6 do 0,7 V, s tímto napětím musíme počítat při volbě odporu  $R_1$  a  $R_2$ :

$$R_1 = \frac{U_{CC} - U_{BE}}{I_d + I_b} \quad (6.11)$$

$$R_2 = \frac{U_{BE}}{I_d} \quad (6.12)$$

### 6.2.2 Darlingtonova dvojice

Darlingtonova dvojice je zapojení dvou bipolárních tranzistorů, kdy kolektor bipolárního tranzistoru T1 je spojen s kolektorem tranzistoru T2.



Obrázek x.y: Titulek

Pokud budou tranzistory polarizovány do aktivního režimu, pro proudy platí následující

$$I_{b1} = (h_{21e(T1)} + 1) \cdot I_{c1} = I_{e1} = \frac{I_{c2}}{h_{21e(T2)}} \quad (6.13)$$

Celkový zesilovací čísel

$$h_{21e} = \frac{I_{c2}}{I_{c1}} = h_{21e(T2)} \cdot (h_{21b(T1)} + 1) \doteq h_{21e(T2)} \cdot h_{21b(T1)} \quad (6.14)$$

Z posledního výpočtu vyplývá, že nejvýhodnější vlastností Darlingtonovy dvojice je celkový proudový zesilovací čísel, který, jak vidíme z příkladu, je součinem proudových zesilovacích číselů jednotlivých tranzistorů.[10]

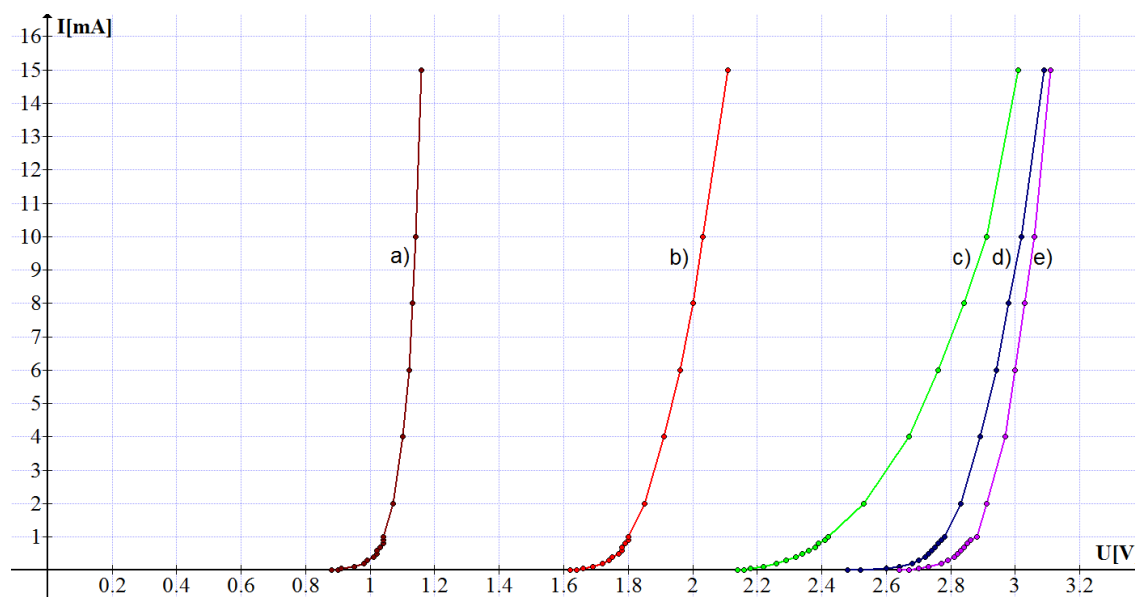
## 7 Měření s LED diodami

### 7.1 Volt-ampérová charakteristika

Voltampérová charakteristika je pro nás důležitá z toho hlediska, že úzce souvisí s energií, která je potřebná pro překročení zakázaného pásu.

Prahové napětí LED diody se přibližně rovná velikosti energie, kterou potřebuje elektron pro překročení zakázaného pásu. Proto můžeme z volt-ampérové charakteristiky leccos zjistit.

#### 7.1.1 VA charakteristika v závislosti na barvě vyzařovaného světla

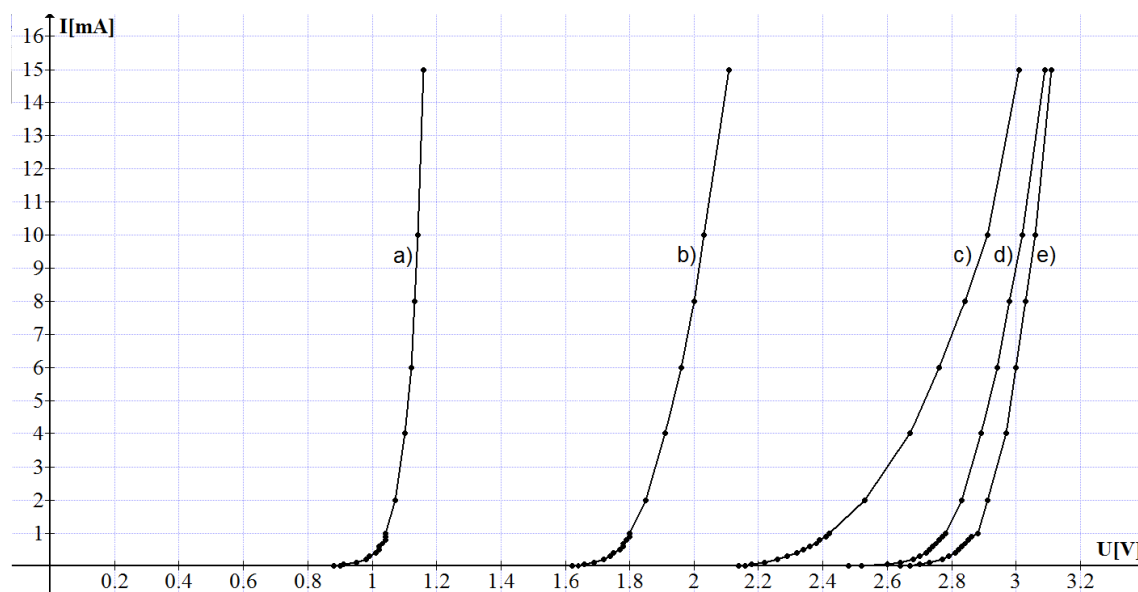


Obrázek 7.1: Volt-ampérová charakteristika LED diody: a) infračervená b) červená c) zelená d) modrá e) ultrafialová

Barvy vyzařovaného světla LED diody nejsou na obrázku seřazeny náhodně. Jak jsme si již řekli, prahové napětí LED diody přibližně odpovídá energii, kterou potřebují elektrony pro přechod zakázaného pásu. Z grafu tedy můžeme vyčíst, že infračervená LED dioda má tento zakázaný pás nejmenší nebo-li elektron potřebuje nejmenší energii pro přechod zakázaného pásu.

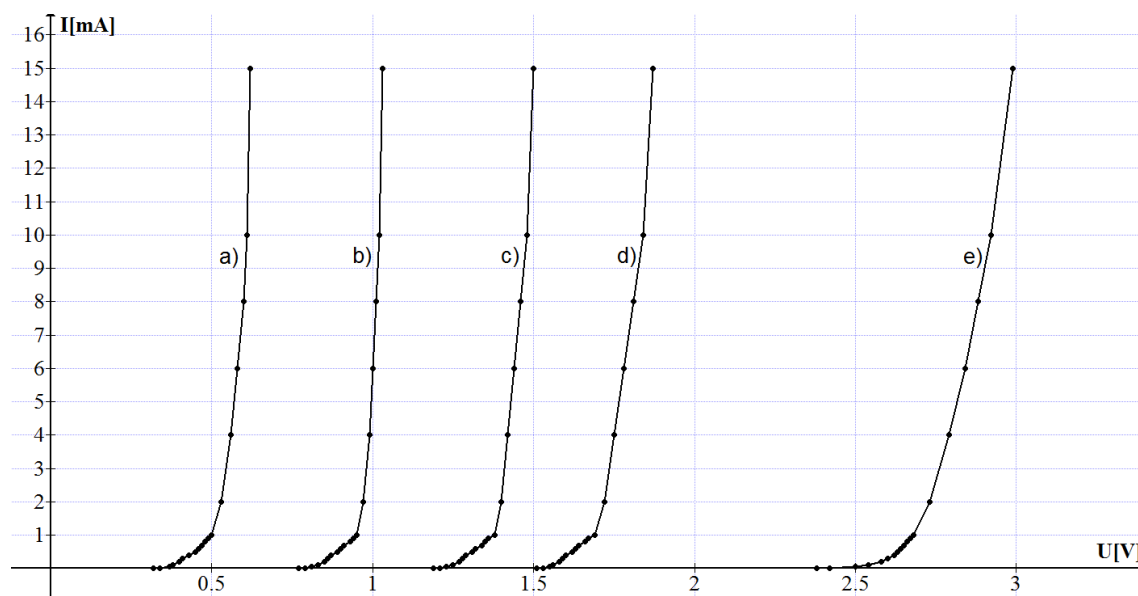
Jak můžeme v grafu vidět, ultrafialová LED dioda má tento zakázaný pás největší, a proto potřebuje více energie než všechny ostatní LED diody.

## 7.1.2 VA charakteristika v závislosti na materiálu součástky



Obrázek 7.2: Volt-ampérová charakteristika LED diody: a) GaAs b) AlGaAs/GaAs c) GaInN/GaN d) GaN e) GaN

V tomto grafu můžeme vidět, že velikost zakázaného pásu také závisí na použitém materiálu LED diody. Křivky b) a c) odpovídají červené a modré LED diodě, tyto diody používají technologii heterogenních přechodů.



Obrázek 7.3: Volt-ampérová charakteristika LED diody a) Ge b) Si c) GaAs d) GaAsP e) GaInN

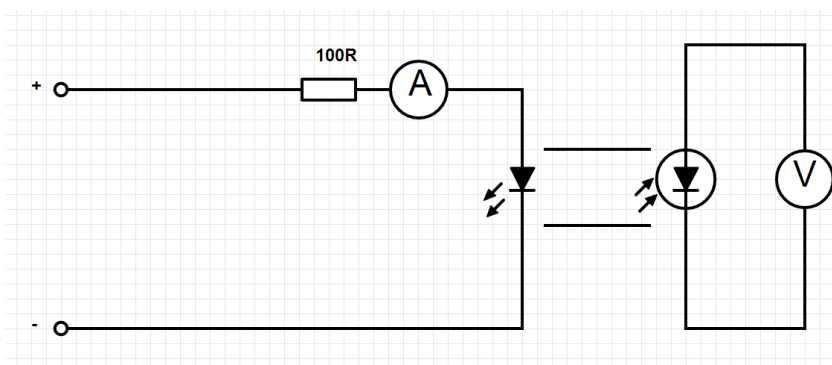
V tomto grafu jsou uvedeny další polovodičové materiály, které se používají nebo používaly na výrobu LED diody.

Tabulka 7.1: Závislost zakázaného pásu na použitém materiálu

Typ polovodičového materiálu	$E_g$ [eV] (přibližná hodnota)
Ge	0,7
Si	1,1
GaAs	1,4
GaAsP	2,0
GaInN	2,9

## 7.2 Fotovoltaický režim LED diody

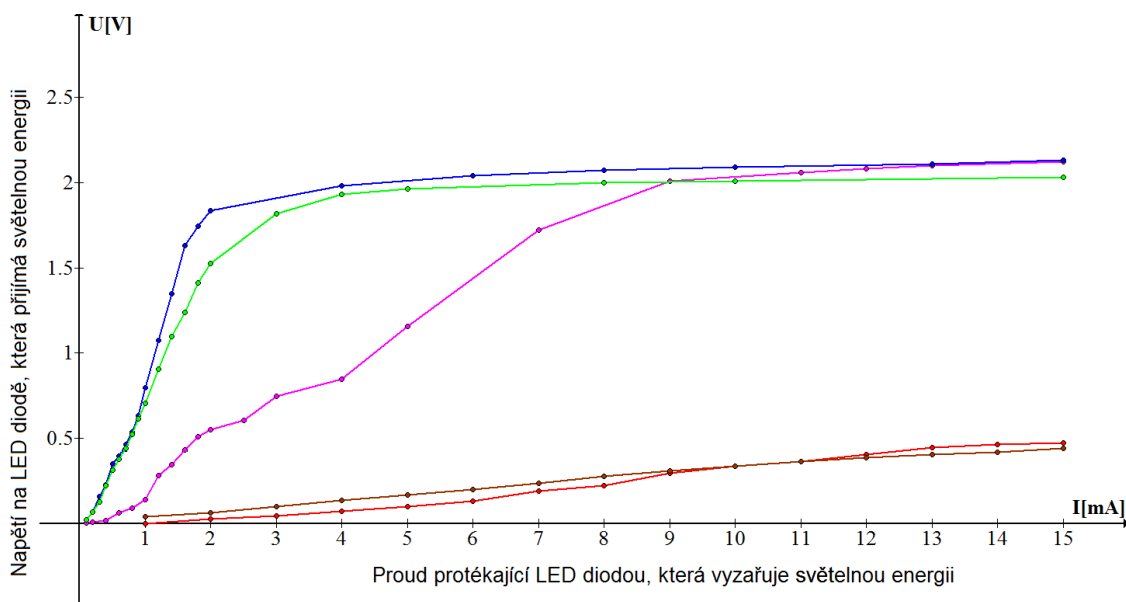
V tomto měření jsme zkoumali 5 různých LED diod v zapojení fotodetektorů a to ultrafialovou, modrou, zelenou, červenou a infračervenou. Pokaždé jsme s jednou LED diodou vysílali světelný tok a přijímaly ho druhou LED diodou, která byla zapojena ve fotovoltaickém režimu. Vysílaný tok LED diody byl usměrněn papírovým válečkem o délce 40mm, tento váleček jsme použili proto, že jsme nechtěli, aby nám sluneční záření zasahovalo do měření.



Obrázek 7.4: Schéma zapojení LED diody

### 7.2.1 Vysílající LED dioda - ultrafialová

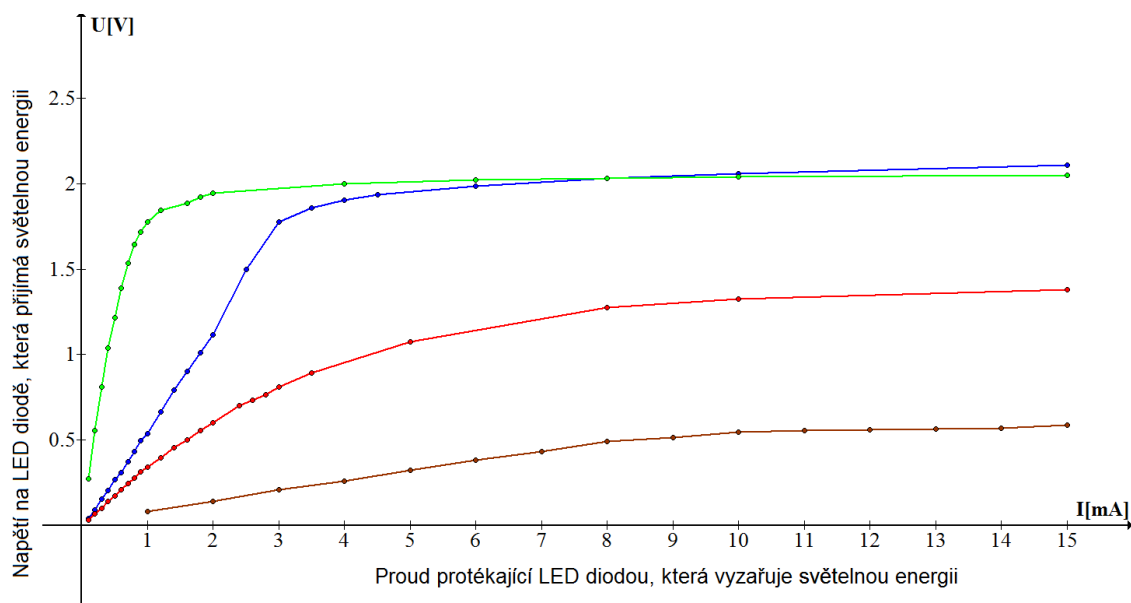
Grafy jsou konstruovány tak, že na vodorovné ose je proud protékající LED diodou, která vyzařuje záření. Na svislé ose je napětí LED diody, která přijímá záření. Dále jsou v grafech barevné křivky, barvy křivek jsou shodné s barvami přijímajících LED diod.



Obrázek 7.5: Graf detekce světla LED diodou

Jako vysílač jsme použili ultra fialovou LED diodu. Z průběhů v grafu vidíme, že ultrafialová LED dioda vybudila všechny LED diody, které byly použity jako detektory. Z toho usuzujeme, že ultrafialová LED dioda dodává potřebnou energii pro překročení zakázaného pásma elektronem.

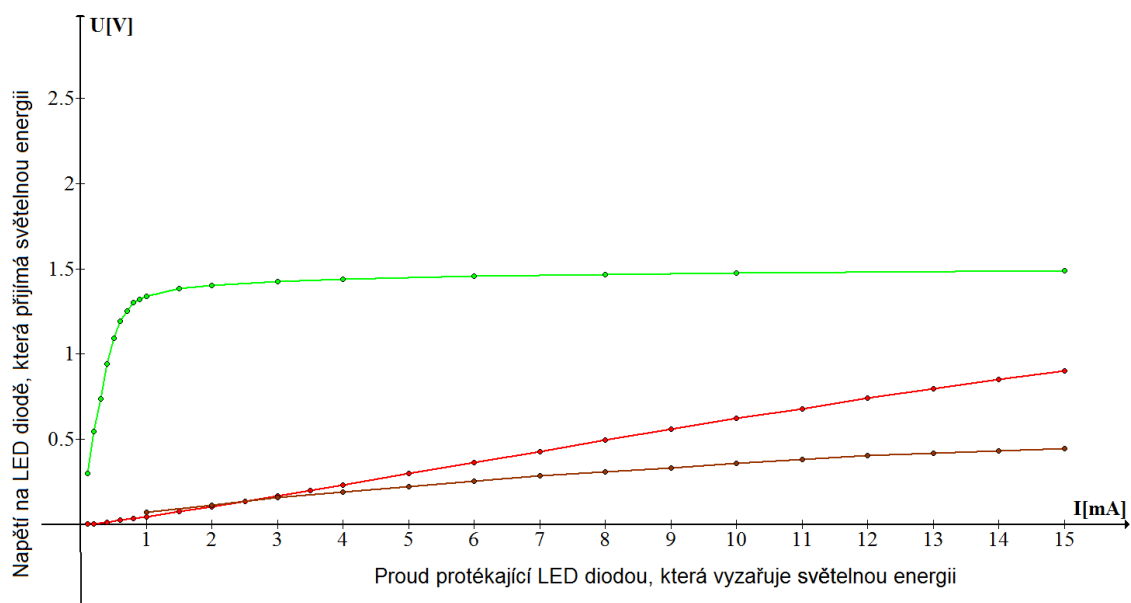
### 7.2.2 Vysílající LED dioda - modrá



Obrázek 7.6: Graf detekce světla LED diodou

Jako vysílač jsme použili modrou LED diodu. Z průběhů v grafu vidíme, že modrá LED dioda nevybudila všechny LED diody, které byly použity jako detektory. Z toho vyplývá, že modrá dioda nedodá dostatečnou energii, aby vybudila diodu ultrafialovou, která potřebuje nejvyšší energii pro překročení zakázaného pásu.

### 7.2.3 Vysílající LED dioda - zelená



Obrázek 7.7: Graf detekce světla LED diodou



Jako vysílač jsme použili zelenou LED diodu. Z průběhů v grafu vidíme, že zelená LED dioda vybudila jen zelenou, červenou a infračervenou LED diodu, které byly použity jako detektory. Z toho vyplývá, že zelená dioda nedodá dostatečnou energii, aby vybudila ultrafialovou a modrou LED diodu, které potřebují vyšší energii pro překročení zakázaného pásu.

Níže je uvedena přehledná tabulka LED detektorů světla. V tabulce jsou zaznamenány barvy světla, které mohou být detekovány různými LED diodami. Tabulka je v plném znění uvedena v příloze C.

Tabulka 7.2: Detekované LED diody

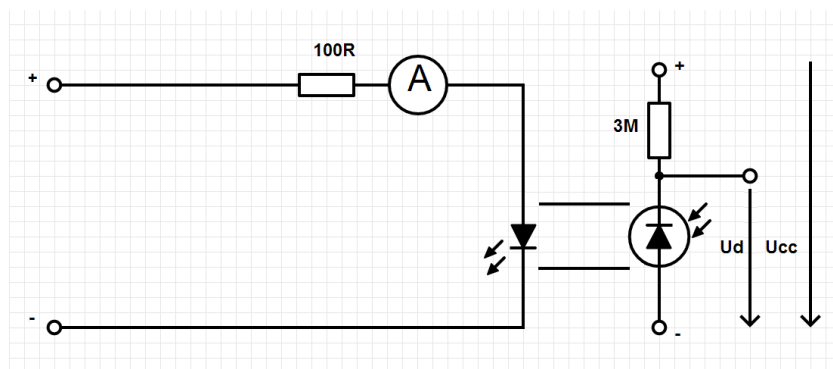
Zdroj I [mA]	Přijímač U [V]									
	Ultrafialový		Modrý		Zelený		Červený		Infračervený	
3,10										
Ultrafialový	1,00	2,04	1,96	2,16	1,94	2,05	0,07	0,33	0,11	0,46
Modrý	x	x	0,81	1,99	1,94	2,01	0,68	1,13	0,29	0,49
Zelený	x	x	x	x	0,04	0,22	1,19	1,26	0,16	0,32
Červený	x	x	x	x	x	x	1,36	1,42	1,40	1,50
Infračervený	x	x	x	x	x	x	x	x	0,67	0,75

### 7.3 Fotovodivostní režim LED diody

V měření bylo použito 5 různých LED diod a to ultrafialová, modrá, zelená, červená a infračervená LED dioda. Měření probíhalo tak, že jsme použili vysílací diodu, která vysílala světelný signál do přijímací LED diody, přijímací dioda byla zapojena ve fotovodivostním režimu. Jako přijímací LED diody jsme postupně vyzkoušeli všechny výše uvedené barvy.

Vyzařovací část zapojení zůstává stejná jako v minulém měření. V přijímací části zapojení je zapojena LED dioda v závěrném směru v sérii s odporem a zdrojem stejnosměrného napětí.

$U_{cc}$  jsme volili jako polovinu průrazového napětí. Průrazové napětí jsme zjistili z datasheetu. Průrazové napětí se rovnalo 5 V, proto jsme napájecí napětí zvolili 2,5 V. V klidovém stavu bylo  $U_d$  rovno 1,96 V. Napětí na diodě  $U_d$  se měnilo s intenzitou ozáření LED diody.



Obrázek 7.8: Schéma zapojení LED diody

Tabulka 7.3: Detekované LED diody

Zdroj I [mA]	Přijímač U [V]									
	Ultrafialový		Modrý		Zelený		Červený		Infračervený	
3,10										
Ultrafialový	1,62	0,93	0,43	-1,72	-0,97	-1,83	1,02	1,86	1,90	1,75
Modrý	x	x	1,81	1,36	0,82	-1,09	1,92	1,82	1,88	1,69
Zelený	x	x	x	x	1,85	1,29	1,74	1,21	1,88	1,70
Červený	x	x	x	x	x	x	1,38	-0,07	1,91	1,81
Infračervený	x	x	x	x	x	x	x	x	1,30	-0,06

Jak vidíme v tabulce, zapojení je velmi citlivé na světelný tok. Z tabulky vyplývá, že stejně jako u minulého měření LED diody s větší šířkou zakázaného pásu nedokázaly

detekovat LED diody s menší šířkou zakázaného pásu. Například zelenou LED diodu dokázaly detekovat LED diody jako je zelená, červená a infračervená z důvodů, které jsme si popsali.

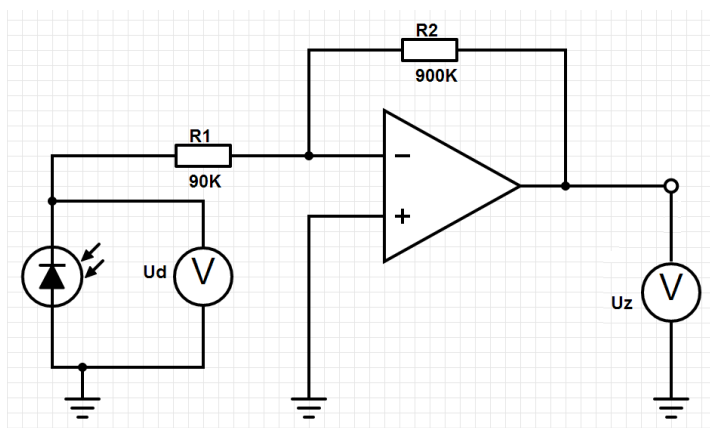
V tabulce jsou také záporné hodnoty. Tyto záporné hodnoty v měření bychom mohli vysvětlit následovně: LED dioda se pomocí světelného toku z vysílající LED diody vybudila natolik, že přešla z fotovodivostního do fotovoltického režimu. Pro upřesnění se podíváme na obrázek x.y, kde se nachází voltampérová charakteristika fotodiody, v této charakteristice jsme přešli ze III. do IV. kvadrantu.

## 7.4 Zesílení přijímaného signálu LED diody

Poté, co LED diodu zapojíme ve fotovoltickém režimu a přiložíme na její svorky voltmetr, můžeme detekovat napětí, pokud je dioda ozářena slunečním nebo jiným zářením. Detekované napětí na LED diodě se pohybuje od několika milivoltu do jednoho voltu. Napětí na diodě záleží na mnoha faktorech např. konstrukce a materiál LED diody, směr paprsků záření, vlnová délka světla. Z důvodů malých napětí při nepřímém ozáření musíme použít zesílení např. invertující nebo neinvertující operační zesilovač.

### 7.4.1 Invertující zesilovač

Jako první zapojení pro zesílení signálu jsem zvolil invertující zesilovač.



Obrázek 7.9: Schéma zapojení invertujícího zesilovače

Odpory v zapojení jsem volil

$$R_1 = 90k\Omega$$

a

$$R_2 = 900k\Omega,$$

z toho vyplývá zesílení

$$A = -\frac{900 \cdot 10^3}{90 \cdot 10^3} = -10$$

Tabulka 7.4: Zesílení signálu fotodiody

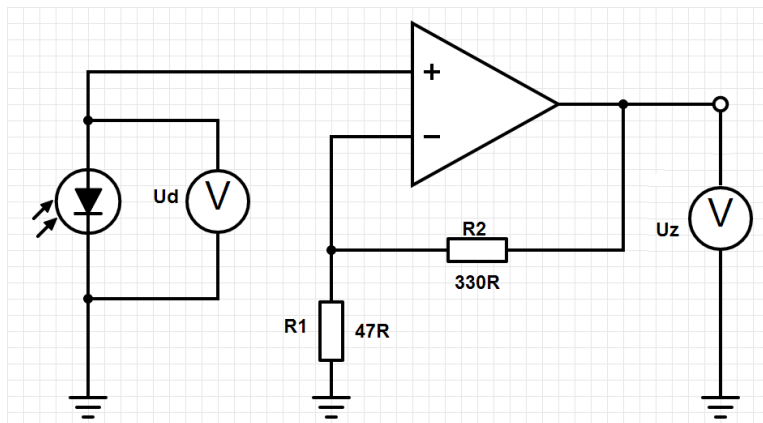
Barva LED diody	$U_d$ [mV]	$U_z$ [mV]
Infračervená	1,4	-14,5
Červená	2,1	-21,3
Zelená	0,2	-2,3
Modrá	0,1	-1,2
Ultrafialová	0,1	-1,1

Z výsledných hodnot z tabulky x.y vidíme, že napětí na LED diodě po připojení na vstup operačního zesilovače nám kleslo na výrazně nižší hodnotu. Úbytek napětí na LED je způsobeno zátěží  $R_1$ , protože LED dioda je měkký zdroj (zdroj o větším vnitřním odporu než je  $1\Omega$ ).

Víme, že ideální zdroj má nulový odpor a napětí na svorkách je nezávislé na zátěži, proto se svorkové napětí LED diody jakožto měkkého zdroje po připojení zátěže (rezistor  $R_1$ ) sníží na hodnoty v tabulce.

#### 7.4.2 Neinvertující zesilovač

Jako druhé zapojení jsem volil neinvertující zesilovač, který se ukázal jako lepší volba.



Obrázek 7.10: Schéma zapojení neinvertujícího zesilovače

Odpory v zapojení jsem volil

$$R_1 = 47\Omega$$

a

$$R_2 = 330\Omega,$$

z toho vyplývá zesílení

$$A = 1 + \frac{330}{47} = 8,02$$

Tabulka 7.5: Zesílení signálu fotodiody

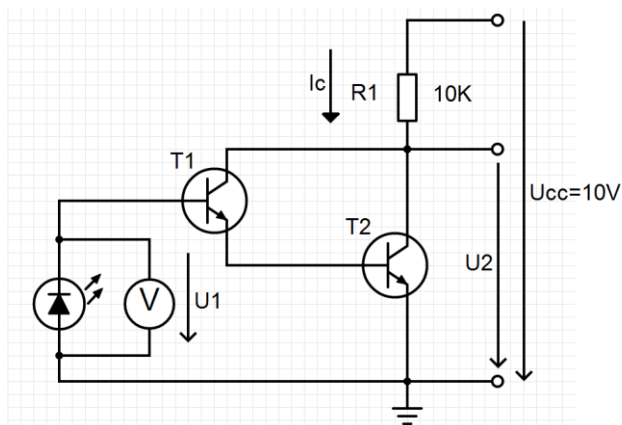
Barva LED diody	U <sub>d</sub> [mV]	U <sub>z</sub> [mV]
Infračervená	122	969
Červená	147	1189
Zelená	19	156
Modrá	10	81
Ultrafialová	4	34

V tabulce 1.2 jsou zapsány výsledky měření, z výsledků vyplývá, že neinvertující zapojení je pro zesílení LED diody lepší.

Zapojení neinvertujícího zesilovače je pro LED diodu efektivnější, vyplývá to z vlastností neinvertujícího zesilovače. Tou nejdůležitější vlastností je nekonečný vstupní odpor (v ideálním případě). Tento velmi vysoký vstupní odpor nám zaručí, že v případě připojení měkkého zdroje (LED diody) nedochází k zatěžování zdroje.

#### 7.4.3 Darlingtonova dvojice

Zapojení tranzistorů Darlingtonova dvojice bylo nejcitlivější ze všech zkoušených zapojení. V tomto zapojení při přímém ozáření LED diody bylo velikost napětí  $U_2$  až 0 V.



Obrázek 7.11: Schéma zapojení Darlingtonovy dvojice

Tabulka 7.6: Citlivost LED diody na sluneční záření

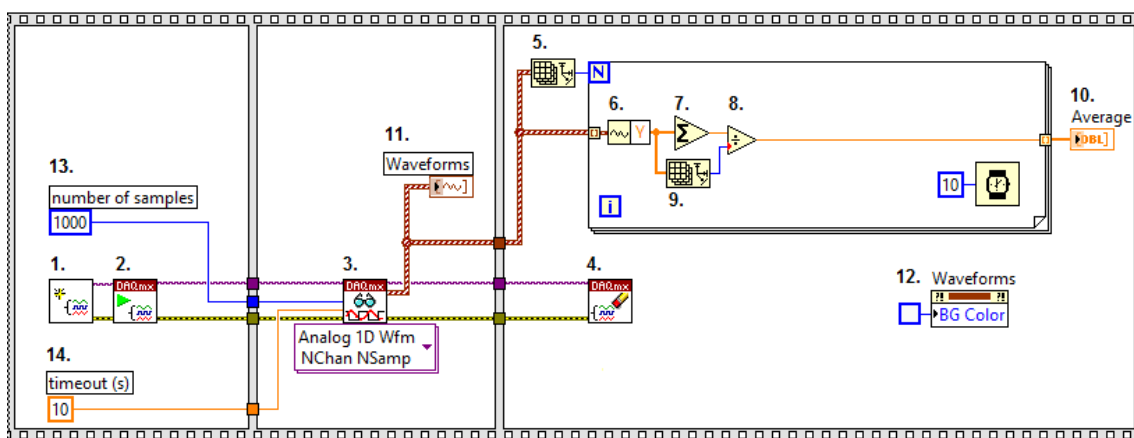
I <sub>c</sub> [mA]	U <sub>1</sub> [V]	U <sub>2</sub> [V]
0,9	1,153	0,73

## 7.5 Detekce slunečního záření LED diody LABVIEW

Pro detekci slunečního záření byl použit program LABVIEW. Tento program pracuje s nepájivým polem. Na tomto nepájivém poli je až devět vstupů, proto nám bylo umožněno měřit na všech LED diodách současně. V grafickém výstupu můžeme lépe vidět různou detekci světla každé LED diody. Do tohoto měření byly vnášeny rušivé vlivy jako např. blikání zářivek, které se nejvíce projeví v grafickém výstupu u červené a infračervené LED diody. Nastávalo rovněž kolísání slunečního záření vlivem oblačnosti.

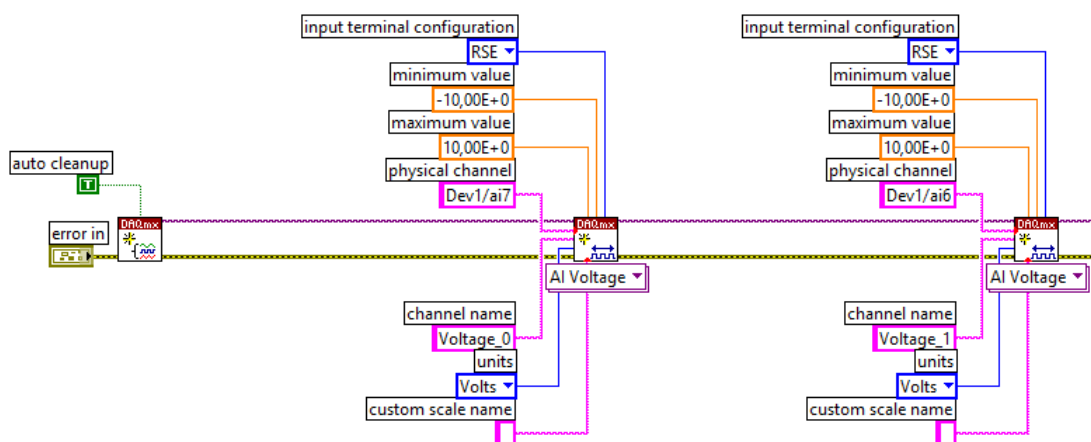
### 7.5.1 Programování LABVIEW

Hlavní bloky tohoto programu jsou bloky 1-4, které tvoří fyzický kanál. V bloku 1. jsou naprogramovány vstupní informace, přesněji řečeno, odkud má program importovat hodnoty pro měření. Blok 2. spouští fyzický kanál. Blok 3. čte vstupní hodnoty. Blok 4. maže hodnoty, aby nedocházelo ke kolizím dat. Blok 13. udává, kolik má být načteno vstupních hodnot. Blok 14. udává dobu, po kterou bude měření probíhat. Blok 11. je výstup načtených hodnot v podobě grafu (Blok 12. nám mění barvu pozadí v grafu). Blok 5. se nazývá velikost pole, udává tedy počet prvků v grafu (blok 11.) a toto číslo předává do počtu provedených cyklů. Blok 6. vrací datové hodnoty z grafu. Blok 9. udává počet prvků, které vygeneroval blok 6. Blok 7. je součet všech hodnot z bloku 6. V 8. bloku se hodnoty 7. bloku vydělí hodnotami 9. bloku, výsledná hodnota putuje na výstup do pole průměr (average).



Obrázek 7.12: Blokové schéma programu

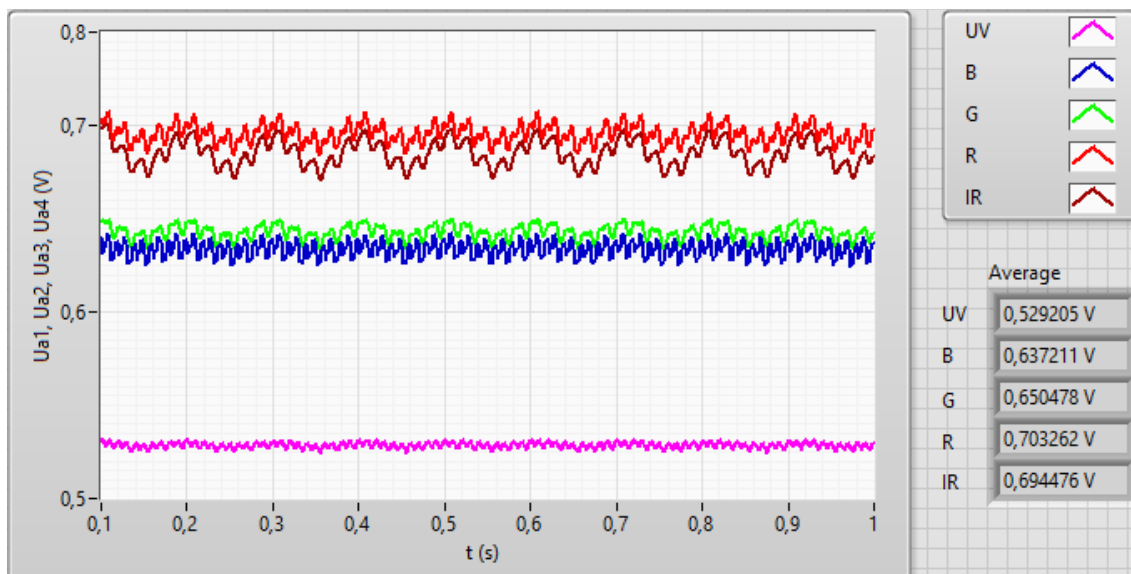
Na obrázku 7.13. je detail 1. bloku, kde lze vidět, že vstupní hodnoty jsou čerpány ze zařízení Dev1 a z fyzických kanálů ai7 až ai2. Hodnoty se pohybují v rozmezí 10 až -10 V.



Obrázek 7.13: Detailní schéma 1. bloku

### 7.5.2 Grafický výstup LABVIEW

Na grafickém výstupu z programu LABVIEW můžeme vidět detekční vlastnosti LED diod na sluneční záření. Nejlepší detekční vlastnosti má červená LED dioda, vyrobená z AlGaAs/GaAs, tímto se potvrdilo měření na klasickém voltmetru.



Obrázek 7.14: Grafický výstup programu

## 8 Závěr

Bakalářská práce je složena ze dvou částí, z části teoretické a praktické. První část se zabývá fyzikálními jevy, jako jsou absorpce, spontánní emise a vnitřní fotoelektrický jev. Fyzikální jev absorpce popisuje chování elektronu při absorbování energie. Spontánní emise popisuje elektron ve stavu, kdy odevzdává energii, je to tedy jev opačný. Vnitřní fotoelektrický jev se zabývá situací, kdy je PN přechod ozářen světelným zářením, díky dopadajícímu záření dokáže polovodič produkovat fotovoltaiické napětí.

V bakalářské práci bylo vysvětleno, na jaké principu funguje LED dioda. Jedná se o princip, kdy je na LED diodu připojeno napětí v propustném směru, toto napětí dodá elektronům dostatečnou energii na to, aby dokázaly překročit zakázaný pás a přesunout se tak do vodivostního pásu. Elektron se ve vodivostním pásu neudrží dlouho, po té co se přemístí zpět do valenčního pásu a rekombinuje s dírou, odevzdává energii rovnající se velikosti zakázaného pásma, tuto energii můžeme vidět ve formě fotonů.

Od velikosti zakázaného pásu LED diody se odvíjí její vlastnosti. Velikost zakázaného pásu závisí na použitém materiálu.

Z výsledků měření voltampérové charakteristiky různých LED diod můžeme usoudit, že prahové napětí LED diod přibližně odpovídalo velikosti zakázaného pásu. Z tohoto měření byla potvrzena teorie, která uvádí, že velikost zakázaného pásu závisí na použitém polovodičovém materiálu.

Z výsledků měření detekčních vlastností, kde byly používány různé LED diody jako fotodetektory, na které byl vyzařován světelný signál, můžeme říct, že pro LED diody s menší šířkou zakázaného pásma platilo, že detekovaly LED diody s větší šířkou zakázaného pásma a naopak, že LED diody s větší šířkou zakázaného pásma nedokázaly detekovat LED diody s menší šířkou zakázaného pásma. Z toho vyplývá, že detekční vlastnosti LED diod jsou ovlivněny velikostí energie, která je na ně vyzařována.

Měření zesilování signálu fotodetektorů proběhlo s operačními zesilovači a s Darlingtonovým zapojením. V měření s invertujícím operačním zesilovačem jsme se potýkali s problémy, které má LED dioda jako měkký zdroj napětí, problémy se týkaly poklesu svorkového napětí na LED diodě po zapojení do obvodu k zátěži  $R_1$ . Invertující zesilovač zesiloval s požadovaným zesílením, ale výstupní hodnoty se pohybovaly v desítkách milivoltů kvůli zmíněnému poklesu svorkového napětí LED diody. Měření s neinvertujícím zesilovačem má výhodu velmi vysokého vstupního odporu. Z této výhody vyplývá, že zapojení nezpůsobovalo pokles svorkového napětí LED diody, jak tomu bylo u invertujícího zapojení. Výstupní hodnoty zesilovače u červené LED diody se pohybovaly okolo 1V. Poslední měření se zesilovači proběhlo s Darlingtonovým zapojením. U Darlingtonova zapojení se násobí proudové zesilovací činitele každého tranzistoru. Z výstupních hodnot měření bylo toto zapojení nejcitlivější, když se hodnoty pohybovaly od 10 až po 0 V.



Poslední měření probíhalo na nepájivém poli s programem LABVIEW, kde byly porovnávány detekční vlastnosti jednotlivých LED diod na sluneční záření. Výhodou tohoto měření bylo zapojení všech měřených LED diod do jednoho nepájivého pole, a tím nám bylo umožněno měřit na všech používaných LED diodách současně.

Teorie popsaná v bakalářské práci byla ověřena v praktických měřeních, čímž byly vědomosti uceleny.

## 9 Použitá literatura

- [1] SCHUBERT, E. Light-emitting diodes. New York: Cambridge University Press, c2003, xii, 313 p. ISBN 05-215-3351-1.
- [2] NICHIA KAGAKU KOGYO KABUSHIKI KAISHA. [online]. [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: <https://www.google.com/patents/US5998925?dq=5998925&hl=en&sa=X&ei=iT28UuSDG4TKhAf3xoHQBA&ved=0CDkQ6AewAA>
- [3] TIEN-FU HUANG, SHIH-HAO HUA a KUO-CHANG HU. [online]. [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: <http://www.google.com/patents/US20080157110>
- [4] Historie LED. [online]. [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: <http://www.svitime-usporne.cz/advisor/historie-led>
- [5] 50. výročí LED: Vynálezce technologie LED Nick Holonyak vzpomíná na svůj objev. [online]. [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: <http://www.enviweb.cz/clanek/svit/93312/50-vyroci-led-vynalezce-technologie-led-nick-holonyak-vzpomina-na-svuj-objev>
- [6] PUŽMANOVÁ. Bílé LED – světlo budoucnosti. [online]. [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/36149.pdf>
- [7] Elektron v krystalu - základy pásové teorie. [online]. [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: <http://www.trunky.cz/bp/fypolo/4.htm>
- [8] SALEH, Bahaa E. Základy fotoniky: fundamentals of photonics. 1. vyd. Překlad Miloslav Dušek. Praha: Matfyzpress, 1995, xxii, 778 s. ISBN 80-858-6305-7.
- [9] BARTŮŠKOVÁ, DUŠEK, FIURÁŠEK, HRADIL, JEŽEK, MIČUDA a SLODIČKA. Vláknová optika na telekomunikačních vlnových délkách. [online]. 2008 [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: [http://muj.optol.cz/download/projects/frvs2008\\_Hradil\\_skriptum.pdf](http://muj.optol.cz/download/projects/frvs2008_Hradil_skriptum.pdf)
- [10] HOSPODKA, Jíří. [online]. [cit. 2014-04-26]. Dostupné z: <http://hippo.feld.cvut.cz/vyuka/elo/cv4/darlington.pdf>
- [11] [online]. [cit. 2014-04-28]. Dostupné z: [http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:4DcS2yAoWk0J:longrik.googlecode.com/svn/trunk/BC/5.Semestr/ESCA/ESCAesca\\_p3.pdf+&cd=1&hl=cs&ct=clnk&gl=cz](http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:4DcS2yAoWk0J:longrik.googlecode.com/svn/trunk/BC/5.Semestr/ESCA/ESCAesca_p3.pdf+&cd=1&hl=cs&ct=clnk&gl=cz)

---

## Seznam příloh

Příloha A:	Měření závislostí zdroje LED diody na detekci LED diody .....	I
Příloha B:	Měření volt-ampérové charakteristiky LED diod .....	V
Příloha C:	Detekce světla LED diodou .....	VI

## Příloha A: Měření závislosti zdroje LED diody na detekci LED diody

Tabulka A.1: Měření ultrafialové LED jako zdroje světelného signálu

Detektory světelného signálu									
Ultrafialová		Modrá		Zelená		Červená		Infračervená	
I [mA]	U [V]	I [mA]	U [V]	I [mA]	U [V]	I [mA]	U [V]	I [mA]	U [V]
0,1	0,004	0,1	0,024	0,1	0,025	1	0,001	1	0,041
0,2	0,009	0,2	0,071	0,2	0,068	2	0,027	2	0,066
0,4	0,020	0,3	0,158	0,3	0,126	3	0,045	3	0,103
0,6	0,063	0,4	0,228	0,4	0,222	4	0,073	4	0,136
0,8	0,091	0,5	0,352	0,5	0,314	5	0,101	5	0,169
1	0,143	0,6	0,395	0,6	0,378	6	0,131	6	0,203
1,2	0,281	0,7	0,463	0,7	0,444	7	0,192	7	0,236
1,4	0,347	0,8	0,537	0,8	0,525	8	0,225	8	0,278
1,6	0,433	0,9	0,632	0,9	0,614	9	0,296	9	0,308
1,8	0,512	1	0,797	1	0,704	10	0,337	10	0,336
2	0,552	1,2	1,074	1,2	0,907	11	0,364	11	0,364
2,5	0,606	1,4	1,350	1,4	1,097	12	0,407	12	0,386
3	0,746	1,6	1,628	1,6	1,238	13	0,445	13	0,406
4	0,846	1,8	1,742	1,8	1,413	14	0,465	14	0,421
5	1,156	2	1,835	2	1,525	15	0,472	15	0,443
7	1,721	4	1,979	3	1,817				
9	2,01	6	2,04	4	1,929				
11	2,06	8	2,07	5	1,961				
12	2,08	10	2,09	8	1,998				
13	2,10	13	2,11	10	2,01				
15	2,12	15	2,13	15	2,03				

Tabulka A.2: Měření modré LED jako zdroje světelného signálu

Detektory světelného signálu							
Modrá		Zelená		Červená		Infračervená	
I [mA]	U [V]	I [mA]	U [V]	I [mA]	U [V]	I [mA]	U [V]
0,1	0,041	0,1	0,273	0,1	0,032	1	0,081
0,2	0,093	0,2	0,554	0,2	0,071	2	0,143
0,3	0,154	0,3	0,812	0,3	0,103	3	0,209
0,4	0,206	0,4	1,037	0,4	0,144	4	0,258
0,5	0,267	0,5	1,217	0,5	0,175	5	0,322
0,6	0,312	0,6	1,391	0,6	0,212	6	0,385
0,7	0,373	0,7	1,536	0,7	0,248	7	0,433
0,8	0,434	0,8	1,643	0,8	0,279	8	0,491
0,9	0,495	0,9	1,718	0,9	0,313	9	0,514
1	0,539	1	1,774	1	0,341	10	0,548
1,2	0,663	1,2	1,842	1,2	0,398	11	0,556
1,4	0,792	1,6	1,887	1,4	0,454	12	0,562
1,6	0,903	1,8	1,921	1,6	0,503	13	0,567
1,8	1,011	2	1,943	1,8	0,554	14	0,571
2	1,114	4	2,00	2	0,601	15	0,586
2,5	1,496	6	2,02	2,4	0,702		
3	1,775	8	2,03	2,6	0,733		
3,5	1,856	10	2,04	2,8	0,767		
4	1,901	15	2,05	3	0,809		
4,5	1,937			3,5	0,891		
6	1,985			5	1,073		
8	2,03			8	1,277		
10	2,06			10	1,324		
15	2,11			15	1,379		

Tabulka A.3: Měření zelené LED jako zdroje světelného signálu

Detektory světelného signálu					
Zelená		Červená		Infračervená	
I [mA]	U [V]	I [mA]	U [V]	I [mA]	U [V]
0,1	0,300	0,1	0,003	1	0,072
0,2	0,545	0,2	0,006	2	0,113
0,3	0,737	0,4	0,016	3	0,158
0,4	0,941	0,6	0,026	4	0,193
0,5	1,094	0,8	0,037	5	0,225
0,6	1,192	1	0,048	6	0,254
0,7	1,251	1,5	0,077	7	0,286
0,8	1,301	2	0,106	8	0,312
0,9	1,322	2,5	0,136	9	0,332
1	1,338	3	0,169	10	0,361
1,5	1,384	3,5	0,200	11	0,381
2	1,403	4	0,234	12	0,404
3	1,427	5	0,300	13	0,418
4	1,440	6	0,363	14	0,434
6	1,457	7	0,428	15	0,447
8	1,468	8	0,496		
10	1,475	9	0,560		
15	1,488	10	0,622		
		11	0,681		
		12	0,741		
		13	0,797		
		14	0,851		
		15	0,904		

Tabulka A.4: Měření červené LED jako zdroje světelného signálu

Detektory světelného signálu			
Červená		Infračervená	
I [mA]	U [V]	I [mA]	U [V]
0,1	0,123	1	0,041
0,2	0,334	2	0,093
0,3	0,559	3	0,152
0,4	0,788	4	0,198
0,5	1,032	5	0,236
0,6	1,231	6	0,284
0,7	1,297	7	0,325
0,8	1,343	8	0,369
0,9	1,362	9	0,418
1	1,384	10	0,481
1,2	1,405	11	0,502
1,4	1,423	12	0,524
1,6	1,431	13	0,527
1,8	1,443	14	0,542
2	1,445	15	0,581
4	1,498		
6	1,513		
8	1,521		
10	1,534		
15	1,553		

Příloha B: *Měření volt-amérové charakteristiky LED diod*

Tabulka B.1: Měření volt-ampérových charakteristik pro různé barvy LED diod

Ultrafialová		Modrá		Zelená		Červená		Infračervená	
I [mA]	U [V]	I [mA]	U [V]	I [mA]	U [V]	I [mA]	U [V]	I [mA]	U [V]
0,01	2,64	0,01	2,48	0,01	2,14	0,01	1,62	0,01	0,88
0,02	2,67	0,02	2,52	0,02	2,16	0,02	1,64	0,02	0,90
0,05	2,70	0,05	2,60	0,05	2,18	0,05	1,66	0,05	0,91
0,1	2,73	0,1	2,64	0,1	2,22	0,1	1,69	0,1	0,95
0,2	2,77	0,2	2,68	0,2	2,26	0,2	1,72	0,2	0,98
0,3	2,79	0,3	2,70	0,3	2,29	0,3	1,74	0,3	0,99
0,4	2,81	0,4	2,72	0,4	2,32	0,4	1,75	0,4	1,01
0,5	2,82	0,5	2,73	0,5	2,34	0,5	1,77	0,5	1,02
0,6	2,83	0,6	2,74	0,6	2,36	0,6	1,78	0,6	1,02
0,7	2,84	0,7	2,75	0,7	2,38	0,7	1,78	0,7	1,03
0,8	2,85	0,8	2,76	0,8	2,39	0,8	1,79	0,8	1,04
0,9	2,86	0,9	2,77	0,9	2,41	0,9	1,80	0,9	1,04
1	2,86	1	2,78	1	2,42	1	1,80	1	1,04
2	2,91	2	2,83	2	2,53	2	1,85	2	1,07
4	2,97	4	2,89	4	2,67	4	1,91	4	1,10
6	3,00	6	2,94	6	2,76	6	1,96	6	1,12
8	3,03	8	2,98	8	2,84	8	2,00	8	1,13
10	3,06	10	3,02	10	2,91	10	2,03	10	1,14
15	3,11	15	3,09	15	3,01	15	2,11	15	1,16



Tabulka B.1: Měření detekce světla LED diodou, fotovoltaický režim

Zdroj I [mA]	Přijímače U [V]														
	Ultrafialový			Modrý			Zelený			Červený			Infračervený		
3, 5, 10															
Ultrafialový	1,00	1,88	2,04	1,96	2,09	2,16	1,94	2,00	2,05	0,07	0,15	0,33	0,11	0,25	0,46
Modrý	x	x	x	0,81	1,25	1,99	1,94	1,98	2,05	0,68	0,92	1,13	0,29	0,44	0,49
Zelený	x	x	x	x	x	x	0,04	0,08	0,22	1,19	1,23	1,26	0,16	0,21	0,32
Červený	x	x	x	x	x	x	x	x	x	1,36	1,39	1,42	1,40	0,26	1,50
Infračervený	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	0,67	0,71	0,75

Tabulka B.2: Měření detekce světla LED diodou, fotovodivostní režim

Zdroj I [mA]	Přijímač U [V]														
	Ultrafialový			Modrý			Zelený			Červený			Infračervený		
3, 5, 10															
Ultrafialový	1,62	1,18	0,93	0,43	-0,67	-1,72	-0,97	-1,55	-1,83	1,02	1,90	1,86	1,90	1,89	1,75
Modrý	x	x	x	1,81	1,63	1,36	0,82	0,33	-1,09	1,92	1,87	1,82	1,88	1,83	1,69
Zelený	x	x	x	x	x	x	1,85	1,73	1,29	1,74	1,55	1,21	1,88	1,83	1,70
Červený	x	x	x	x	x	x	x	x	x	1,38	1,02	-0,07	1,91	1,89	1,81
Infračervený	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	1,30	0,82	-0,06